



Kobe University Repository : Thesis

学位論文題目 Title	機能性位相変調パターンの光学的応用に関する研究
氏名 Author	最田, 裕介
専攻分野 Degree	博士（工学）
学位授与の日付 Date of Degree	2016-03-25
公開日 Date of Publication	2017-03-01
資源タイプ Resource Type	Thesis or Dissertation / 学位論文
報告番号 Report Number	甲第6649号
権利 Rights	
URL	http://www.lib.kobe-u.ac.jp/handle_kernel/D1006649

※当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。
著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

Create Date: 2017-12-18



博 士 論 文

機能性位相変調パターンの光学的応用に関する研究

平成 28 年 1 月

神戸大学大学院システム情報学研究科

最田 裕介

目次

第 1 章 序論	1
1.1 本研究の位置付け	1
1.2 研究背景	2
1.2.1 現在の光ストレージとホログラフィックメモリの課題	2
1.2.2 波面計測技術と Shack-Hartmann 波面センサーの課題	8
1.2.3 3次元ディスプレイの現状と課題	11
1.3 本論文の構成	12
第 2 章 位相マスク設計によるホログラフィックメモリの光利用効率・干渉効率改善	15
2.1 緒言	15
2.2 空間位相変調光波を用いたコアキシャルホログラフィックメモリ	15
2.2.1 位相マスクによる空間周波数分布の光強度局在化低減作用	15
2.2.2 空間周波数分布と Nyquist 開口	17
2.2.3 位相マスクのはたらきと設計の指針	18
2.3 位相マスクの設計方法	20
2.3.1 位相マスクの最適化手法	20
2.3.2 参照位相マスクの設計	21
2.3.3 入力位相マスクの設計	24
2.4 設計された位相マスクの数値的評価	25
2.4.1 空間周波数分布による位相マスクの性能評価	25
2.4.2 記録・再生シミュレーションによる位相マスクの検証	28
2.5 記録・再生光学実験	30
2.6 結言	32
第 3 章 ページデータ分布と再生像品質を考慮した入力位相マスク設計法の改良	33
3.1 緒言	33
3.2 入力位相マスク設計法の課題	33
3.2.1 信号光の空間周波数分布の曖昧性	33
3.2.2 信号光への空間位相変調による再生像品質の低下	34
3.3 入力位相マスク設計法の改良	35
3.3.1 ページデータ分布を考慮した入力位相マスクの設計	35
3.3.2 隣接画素間位相差の制限	37

3.4	記録・再生シミュレーションによる設計条件の決定	39
3.5	結言	42
第 4 章	空間位相変調技術を用いた広ダイナミックレンジ波面センサー	43
4.1	緒言	43
4.2	ホログラフィック Shack-Hartmann 波面センサーのダイナミックレンジ拡大原理	43
4.2.1	マイクロホログラムアレイによる可識別パターン像取得	43
4.2.2	相関ピーク変位検出法	45
4.2.3	マイクロホログラムアレイの設計	46
4.3	Zernike の多項式による波面近似	48
4.4	波面計測光学実験	49
4.5	波面計測シミュレーションによるダイナミックレンジおよび計測精度の定量評価	53
4.6	ハニカム構造の導入による解析の高速化と空間分解能の向上	59
4.7	結言	60
第 5 章	2 値位相ホログラムの設計によるホログラフィックディスプレイの画質向上	61
5.1	緒言	61
5.2	Fresnel ピンポンアルゴリズムに基づいた 2 値位相ホログラム設計法	61
5.3	数値再生シミュレーションによる 2 値位相ホログラムの画質評価	63
5.4	光学再生による 2 値位相ホログラムの再生像の評価	66
5.5	結言	68
第 6 章	総括	69
	参考文献	
	謝辞	
	研究業績	

第 1 章 序論

1.1 本研究の位置付け

光のもつ振幅，位相，偏光，波長などの物理パラメータのうち，位相情報は光を波動（光波）としてあつかう場合に，その光波がどの方向に伝搬していくのかをあらわすものである．光波の位相が一定の面（等位相面）は波面と呼ばれる [1]．面内で一律な位相分布をもつ平面波は一つの方向に拡がりを変えずに直進するのに対し，光波の位相に分布があれば，その分布に応じて光波は異なった方向に伝搬することになる．このとき，光波の位相を任意の位相値の空間分布である空間位相変調パターンを用いて変調することにより，伝搬後の光波のふるまいを制御することが可能である．この性質を利用し，ガラスやアクリル樹脂などの位相物体は光波の位相分布を容易に変調できる媒体としてさまざまな用途に用いられてきた．位相物体が利用されている身近な例としてレンズがある．レンズは光波に収束あるいは発散の位相変調作用を与えるように設計された空間位相変調パターンからつくられた機能性光学素子であり，眼鏡やカメラなどに広く用いられている [2]．また，拡散板は光波に空間的にランダムな分布の位相変調を与えることによって光波を拡散させる素子であり，拡散板を通して見た際に反対側の物体が視認しにくくなるように家屋の窓に磨りガラスとして用いられ，科学技術用途にも広く利用されている [3,4]．

これらのように，特定の用途に対して適切に設計された空間位相変調パターンを本論文では機能性位相変調パターンと呼ぶ．これは上述した身近な例も含めたさまざまな光学的応用分野の問題解決・性能向上に有用である．光波への空間的な位相変調は，光学的には機能性位相変調パターンをもとに微細加工された位相物体により実現されるほか，近年では容易に表示パターンの書き換えが可能な空間光変調器（SLM : Spatial Light Modulator）が実用化され広く用いられている．特に以降，位相変調型の SLM を P-SLM（Phase-modulated SLM）とする．P-SLM により高精度かつ容易に実現可能になった機能性位相変調パターンは，レーザー加工 [5,6] や光ピンセット [7,8] などに用いられる特異な強度分布をもつビームの生成に利用されているほか，光通信 [9]，光記録 [10]，光計測 [11]，3 次元ディスプレイ [12,13] などの分野にも応用されている．

本論文は，近年の映像産業を中心に生成されるデータ量の爆発的な増大を研究の中心的な問題として取り上げ，機能性位相変調パターンを用いてこれを取り巻く周辺分野の問題解決を図るものである．具体的には，大容量データの保存媒体となる光ストレージ，光ストレージにおいて安定的にデータを記録・再生するための波面計測技術，映像データの中でも特にデータ量の大きい 3 次元ディスプレイの三つの分野に対し，

機能性位相変調パターンを用いてこれらの性能を向上させることが本研究の目的である。次節から、各周辺分野の技術的背景と課題について述べる。

1.2 研究背景

1.2.1 現在の光ストレージとホログラフィックメモリの課題

情報化社会の進展と、その中で生み出される情報管理の問題は切り離せない密接な関係にある。有線・無線双方のネットワーク技術の発展、インフラの整備により、現在ではコンピューターやスマートフォンなどに留まらず、自動車、生活家電、医療機器に至るまであらゆるモノがインターネットに接続されている。誰もが時間、場所を問わずさまざまな情報にアクセスすることが可能になり、まさしく IoT (Internet of Things) 時代の到来といえる [14]。このような中、全世界で生成されるデータ量は年々指数関数的に増加の一途を辿り、今後数年間で 40 ZB (Zettabyte) に達すると予測されている [15]。特に映像分野では、NHK が中心となって研究を進めている 8K (画素数 7680×4320) スーパーハイビジョンと呼ばれる超高精細映像放送 [16] が現実味を帯びてきており、一般的にも 4K (画素数 3840×2160) ディスプレイや 3 次元映像コンテンツが浸透しつつあることから、映像産業におけるデータ量の増大が著しいことがわかる。また、クラウドサービスや SNS (Social Networking Service) の浸透、センサーネットワークの発達により生成・蓄積された、いわゆるビッグデータを活用した発展の可能性についても注目されている [17]。すなわち、これらの膨大なデータは単に保存されるだけでなく、自由にアクセスできることが望ましい。

このような社会的背景の中で、生成されるデータ保存用のアーカイブストレージが重要視されている。データのアーカイブ用途には

- (1) データの長期保存性
- (2) システムや記録メディアを含めたコストの低さ
- (3) 低消費電力

の三つの特性を兼ね備えたストレージが用いられることが理想的である。現在、一般的に用いられているストレージは大きく磁気記憶装置、半導体メモリ、光ディスクに分類される [18]。磁気記憶装置であるハードディスクドライブ (HDD) や磁気テープは容量単価が非常に安価であるが、外部からの振動、衝撃や強い磁気にさらされることにより記録されたデータが破壊されるなど保管環境による劣化が激しい。また、保存されたデータにアクセスするためには常に通電しておく必要があるため消費電力が大きい。不揮発性の半導体メモリであるフラッシュメモリは、非常に高速なデータ転送が可能であり、消費電力も磁気記憶装置と比較して低いが、原理的に数十年のデー

Table 1.1 従来の光ディスクの仕様

	CD	DVD	BD
Wavelength of light source [nm]	780	650	405
Numerical aperture of objective lens	0.45	0.60	0.85
Capacity for single layer [GB]	0.7	4.7	25
Data transfer rate [Mbps]	1.4	10	38

タ保存には耐えられず、容量単価も高い。そのため、これらはともに (1) ~ (3) の要件をすべて満たしているとはいえない。それに対して、光ディスクは長期に渡り安定的にデータを保存しておくことが可能であるほか、メディアコストや消費電力の面でもアーカイブストレージとして実用的である。しかし、磁気記憶装置の一つである HDD は記録容量が数 TB (Terabyte)、データ転送率は数百 Mbps (Megabit per second) を実現しているのに対し、現在実用化されている光ディスクはこれには大きく及ばない。このため、さらなる大容量データアーカイブの需要を満足し得るテラバイト級の記録容量と数 Gbps (Gigabit per second) のデータ転送率を有する光ストレージの実用化が急務であるといえる。

現在実用化されている光ディスクには Table 1.1 に示すように、Compact Disc (CD)、Digital Versatile Disc (DVD)、Blu-ray Disc (BD) があり、それぞれ記録メディアのコストの低さ、装置に対する互換性と可換性の高さ、複製の容易さから、音楽や映像データなどのコンテンツ流通において重要な役割を果たしている [19]。これらの光ディスクはビームを対物レンズにより集光し、その集光スポットを記録メディアの記録層上にビットバイビットで照射することによりデータの記録・再生をおこなう。つまり、集光スポット径を縮小することにより記録密度の向上が可能である。集光スポットの半径 r は円形開口の Fraunhofer 回折像であるエアリーパターンの第一暗輪の半径として、光源レーザーの波長 λ とレンズの焦点距離 f および開口径 D を用いて

$$r = 1.22 \frac{\lambda f}{D} \quad (1.1)$$

であらわされる [20]。また、対物レンズの F 値 (F/#) は

$$F/\# = \frac{f}{D} \quad (1.2)$$

であらわされる [21]。さらに、レンズの開口数 (NA : Numerical Aperture) と F 値には

$$NA = \frac{1}{2F/\#} \quad (1.3)$$

の関係がある。(1.2) 式と (1.3) 式を用いると, (1.1) 式は

$$r = 0.61 \frac{\lambda}{\text{NA}} \quad (1.4)$$

とあらわすことができる。すなわち, 光源レーザーの短波長化と対物レンズの高 NA 化が集光スポット径の縮小につながり, これにより記録密度が向上する。従来の光ディスクはすべてこの同様の原理に基づき大容量化と高速化を達成してきた [22] が, 光源のさらなる短波長化には, 安価かつ高出力な紫外半導体レーザーが必要となるほか, 紫外域でも実用可能な対物レンズやメディア材料を新たに開発しなければならない。また, 対物レンズの NA も記録メディアとの間の媒質が空気である限り BD の 0.85 を超えることは困難である。記録層の多層化によりさらなる大容量化は可能であるが, 4 層で 128 GB の BDXL 規格が実用化に至っているに留まっていた [23]。しかしながら, このような従来の光ディスクはその後研究が続けられ, 最近では BD の光源波長と対物レンズの NA はそのままに, トラックピッチの縮小や記録メディア両面への記録により記録密度を高めた Archival Disc (AD) が開発され, ディスク 1 枚あたり 300 GB の AD の仕様が策定された [24]。今後もノイズ低減技術や多値記録・再生技術の導入により 1 TB まで発展させるロードマップが描かれ, アーカイブ用途の光ディスクシステムとして大きく期待されている。

これに対し, 新たな記録方式に基づいた光ストレージとして, 近接場光記録方式 [25], Super-RENS (Super-REsolution Near-field Structure) 方式 [26], 2 光子吸収超多層記録方式 [27], 体積ホログラム記録方式 [28] などの研究もおこなわれている。これらのうち, 体積ホログラム記録方式は非線形光学材料のフォトリフラクティブ効果を利用したものであり, 光波の干渉を利用して厚みのある記録メディア中に 3 次元的にホログラムを記録するものである。これは一般的にホログラフィックメモリ [29,30] と呼ばれ, 原理は 1963 年に Heerden によって提案された比較的古くからある技術である [28] が, 近年の SLM や撮像素子, 記録メディアなど周辺要素技術の発達によって再び次世代の光ストレージ技術として注目されるようになってきた。ホログラフィックメモリを実現する光学系は, Mach-Zehnder 干渉計に基づいた二光束干渉方式や参照光が不要な自己参照型ホログラフィックメモリ [31] などさまざまなものが提案されているが, 本論文では堀米らによって考案されたコリニア方式 (またはコアキシャル方式とも呼ばれ, 以降これを用いたものをコアキシャルホログラフィックメモリと呼ぶ) [32,33] と呼ばれる同軸型光学系をあつかう。この方式の特徴として, 二光束干渉方式における参照光側の光路が不要であるため, 光学系の小型化が可能であり振動にも強い。また, 信号光と参照光が同一光路を通るため, 双方への空間的な位相変調が容易であることも利点である。

コアキシャルホログラフィックメモリの原理について述べる．コアキシャルホログラフィックメモリは Fig. 1.1 に示すように，中心の信号光とその周囲を取り囲むリング状の参照光を同軸上に配置したものである．記録過程では，光源であるレーザーから射出されたビームはコリメートされた後に振幅変調型の空間光変調器（Amplitude-modulated SLM，以降 A-SLM とする）を照明する．A-SLM には Fig. 1.2 に示すような，2次元のデータとして ON セル（振幅透過率 1）と OFF セル（振幅透過率 0）によりデータを表現したページデータと参照光パターンを表示し，これにより空間的に振幅変調された光波がそれぞれ信号光と参照光となる．ページデータは，2/4 変調符号 [34] やスパース変調符号 [35] などのホログラフィックメモリに適した符号化法により生成される．これらは，数セルをまとめてシンボルという単位としてあつかうことにより，符号化率は低下するが各ページデータにより生成される信号光のエネルギーを一定に保ち，かつノイズにも強いデータの表現が可能である．本研究では 2/4 変調符号により符号化されたページデータを採用している．2/4 変調符号は Fig. 1.3 に示す

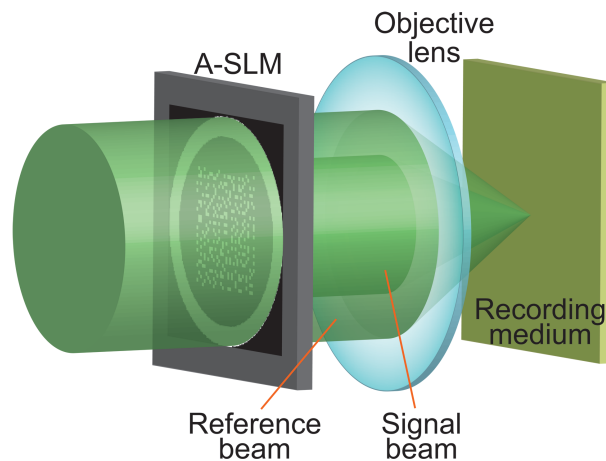


Fig. 1.1 コアキシャルホログラフィックメモリの概念図

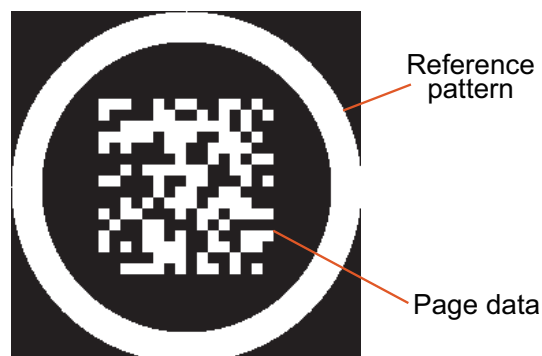


Fig. 1.2 コアキシャルホログラフィックメモリにおける入力振幅変調パターン

ように 2×2 セルのうち 1 セルを ON セル, 3 セルを OFF セルとしたシンボルを用いてページデータを構成する符号化法であり, シンボル内の ON セルの位置の組み合わせで “00”, “01”, “10”, “11” の 4 通りのデータ (2 bit) を表現する. 4 bit を用いて 2 bit を表現するため符号化率は $1/2$ である. これに対し, 参照光パターンにも径の異なる多重リングパターンや放射状のラインパターン, ランダムパターンなどさまざまなものが提案されている [36]. 同軸上を伝搬する信号光と参照光はともに Fourier 変換レンズとして作用する単一の対物レンズにより集光され, その焦点面 (Fourier 変換面) では A-SLM に表示したパターンの空間周波数分布が得られる. すなわち, コアキシャルホログラフィックメモリでは A-SLM 面に対する Fourier 変換面近傍で両光波の空間周波数分布が重なる領域において干渉し, 3 次元的に干渉縞が発生する. このため, 信号光と参照光の Fourier 変換面におけるふるまいが記録特性に影響を与える. 記録メディアにはフォトポリマー材料 [37] やフォトリフラクティブ結晶 [38] などが用いられ, 干渉縞の強度分布に応じた屈折率分布 (ホログラム) が記録メディア中に形成される. 再生過程では Fig. 1.2 のパターンのうち参照光パターンのみを A-SLM に表示して光波を変調することにより参照光のみを生成し, これをホログラムに照射することにより, 記録時に照射された信号光が再生される. これを撮像素子で強度分布画像として取得することにより記録されたデータが得られる.

ホログラフィックメモリでは, 記録メディアの同一箇所にも複数のページデータを多重記録し, 再生時には記録された各ページデータを選択的に読み出すことが可能である. これは, 厚みのあるメディアに記録されたホログラムによって回折した光波の回折効率が, 再生光の位相整合条件にしたがって変化することを利用しており, 再生時の参照光が Bragg の回折条件 [39] を満たしていれば高い回折効率でページデータが再生される. この条件は再生時の参照光が記録時と一致しているときのみ満たし, そこから外れていくにつれて徐々に回折効率は低下していき, やがて回折光があらわれな

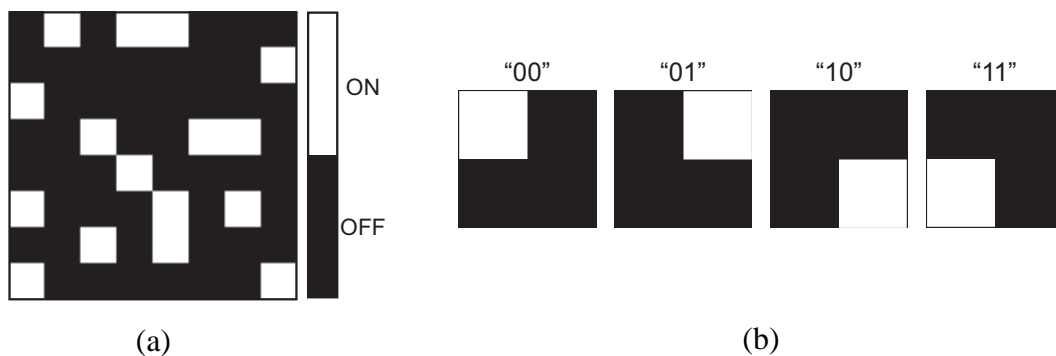


Fig. 1.3 (a) 2/4 変調符号により符号化されたページデータ; (b) シンボル

くなる．この特性を利用して，角度多重 [40]，波長多重 [41]，スペックル多重 [42]，シフト多重 [43] などさまざまな多重記録方式が提案されている．角度多重記録方式は記録ごとにメディアへの参照光の入射角度を変えることにより多重記録をおこなう．ある入射角度の参照光で記録されたホログラムからの回折光強度は，再生時の参照光の入射角度が記録時と一致したとき Bragg の回折条件を満たして最も高くなり，入射角度が外れていくと徐々に回折光強度が低下する．これが最も基本的な多重記録方式であり，二光束干渉方式において一般的に用いられているものであるが，コアキシャルホログラフィックメモリでは信号光と参照光を単一の A-SLM により生成するため，参照光の入射角度を変えることは容易ではない．そのため，コアキシャルホログラフィックメモリではシフト多重記録方式が一般的に用いられている．シフト多重記録方式は記録メディアを面内方向にシフトし，各ホログラムがわずかにずれた位置で記録するものである．この方式は，光学系を固定したまま，記録メディアの面内シフトのみにより実現可能であるため，信号光と参照光が共通光路であるコアキシャルホログラフィックメモリに適した多重記録方式である．また，記録メディアの面内シフトはディスク状メディアの回転により実現することができるため，従来の光ディスクシステムに近い構造のシステム構築が可能である．以上のように，ホログラフィックメモリでは 2 次元配列されたデータをページ単位で一度に記録・再生することが可能であり，記録メディアの同一箇所への多重記録が可能であるため非常に高速なデータ転送と記録容量の飛躍的な向上が期待できる．特に，並列データ処理によって実現される高データ転送率は他の光ストレージ技術に対する大きな利点である．また，ホログラフィックメモリに光暗号化技術を導入した例 [44] や光相関器への応用例 [45] も報告されており，幅広い応用が可能な技術であるといえる．

これまで，ホログラフィックメモリの性能を評価する指標として，主に記録密度と再生像の信号対雑音比（SNR : Signal to Noise Ratio）が用いられてきた．ホログラフィックメモリでは，記録密度はホログラムサイズと多重記録可能数によって決まり，再生像の SNR は信号光と参照光の干渉度合いの適切さ（以降，干渉効率とする）によって決まるといえる．これらを向上させるために，従来からランダム位相マスクにより信号光および参照光を空間的に位相変調する手法が用いられてきたが，光源エネルギーの利用効率（以降，光利用効率とする）については考慮されていなかった．光利用効率は，記録メディア上における信号光と参照光の占有領域が一致し，フィルタなどによるエネルギーロスなく記録・再生がおこなわれるときが最も高いといえる．そこで本研究では，干渉効率および光利用効率を向上可能な位相マスクを設計し，これを適用することによって効率的な光源エネルギーと記録メディア利用の観点からホログラフィックメモリの性能向上を図る．

1.2.2 波面計測技術と Shack-Hartmann 波面センサーの課題

光波の位相分布は局所的な勾配をもった波面が分布したものとみなすことができ、これを計測するためのシステムは波面センサーと呼ばれ、さまざまな分野で利用されている。波面センサーが用いられている例として、補償光学システムがある。補償光学システムは Fig. 1.4 に示すように波面センサーと波面補償器から構成されるものである。波面センサーによって外乱による波面収差を計測し、その計測結果を可変鏡や SLM などにより実現される波面補償器 [46] にフィードバックすることにより外乱を解消する。これは主に、大型天体望遠鏡 [47,48] や眼底検査装置 [49–52]、自由空間光通信 [53,54] など、観測対象までの空間が波面収差の発生要因となる媒質で満たされ、通常の結像系が成り立たない環境においても高解像なイメージングが実現できるよう利用されるものである。このように、精密な光波の応用分野では波面の状態を常にモニタリング・制御することが重要であり、1.2.1 項で述べたホログラフィックメモリにおいて安定的な記録・再生をおこなう際にも同様のことがいえる。

位相分布の計測方法としては一般的には干渉計測法が利用されているが、これには光学系が大型かつ複雑になり、それゆえに振動にも弱いという欠点がある。また、補償光学用途では微弱な強度の光波を計測する必要があるため不向きである。そのため、補償光学システムにおける波面センサーとしては波面曲率センサー [55] や Shack-Hartmann 波面センサー (SHWFS) [56] が用いられている。波面曲率センサーは、光軸方向で前後に焦点を外れた二つのデフォーカス像に波面の曲率に応じた強度変化が生じることを利用し、それらの差を解析することによって位相分布を算出するものである。それに対し、SHWFS は微小な凸レンズを 2 次元的に配列した光学素子であるマイクロレンズアレイと撮像素子を組み合わせた簡易な光学系で構成される。非常に高精度な計測が求められるレンズやミラーなどの光学素子の形状計測用途には、

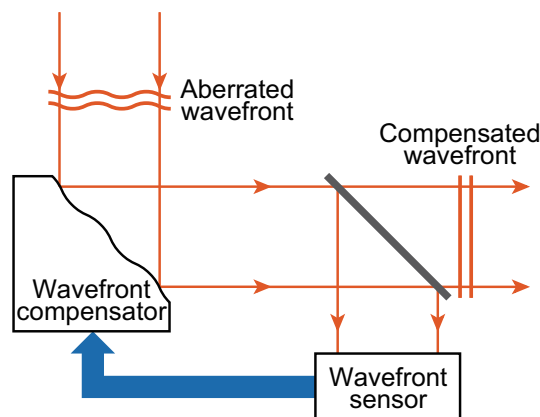


Fig. 1.4 補償光学システムの概念図

Fizeau 干渉計 [57] や Twyman-Green 干渉計 [58] などが主に用いられているが、精度では劣るものの簡易な計測が可能であることから、この用途でも SHWFS が利用されることもある。

SHWFS は Fig. 1.5 に示すような簡易な光学系で実現され、被計測波面をマイクロレンズアレイの小開口に空間的に分割し、その焦点面上に生じる集光スポットの分布を撮像素子で取得する。各マイクロレンズにはその口径に対応する画素数の正方領域（以降、検出域と呼ぶ）が撮像素子上に割り当てられる。SHWFS への入射波面が光軸に対して傾きのない平面波である場合、集光スポットは各マイクロレンズの光軸上、すなわち検出域の中心にあられる。一般的にこの平面波が参照波面であり、このときの集光スポット位置を波面計測の基準位置とする。これに対し、入射波面が収差のある波面である場合、これはさまざまな位相勾配が空間的に分布したものとみなすことができる。このため、各マイクロレンズで空間的に分割された入射波面のそれぞれの平均位相勾配に対応した位置に集光スポットがあらわれる。入射波面の局所的な位相勾配は、これら集光スポットの基準位置からの面内変位から容易に求めることができる。Fig. 1.6 に各検出域における波面の x 軸方向の位相勾配の算出原理を示す。 x 軸方向の位相勾配は、

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\Delta x_i}{f} \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.5)$$

により算出することができる [59]。ここで、 Φ は入射波面の位相、 Δx_i は i 番目の検出域における x 軸方向のスポットの変位量、 f はマイクロレンズアレイの焦点距離、 λ は光源の波長をあらわしている。 y 軸方向の位相勾配の算出についても同様である。この計算をすべての検出域に対しておこなうことにより、マイクロレンズアレイの小開口ごとに離散化された位相勾配分布を得ることができる。さらに、求めた位相勾配分

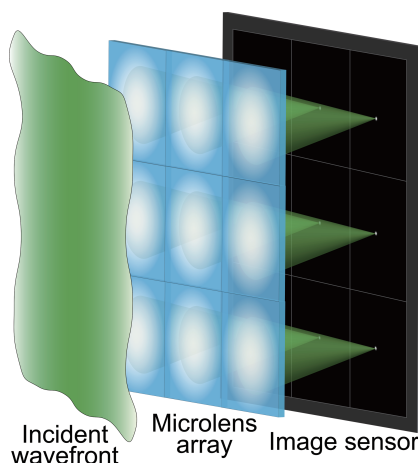
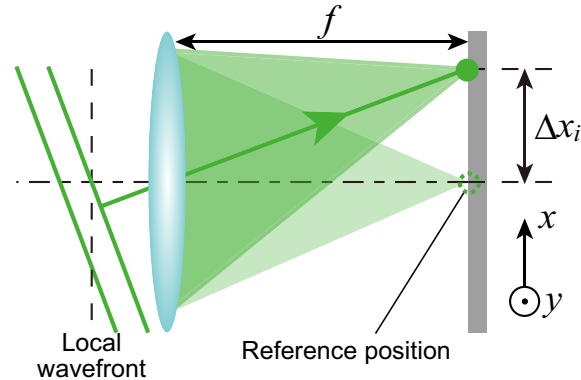


Fig. 1.5 Shack-Hartmann 波面センサーの概念図

Fig. 1.6 x 軸方向の位相勾配算出原理

布を Zernike の多項式 [60–62] を用いてフィッティングすることにより近似波面が得られる。

SHWFS では基本的に各集光スポットと検出域はそれぞれ 1 対 1 に対応付けされている必要がある。しかしながら、非常に大きな収差をもった波面を計測する場合、集光スポットは検出域内に収まらず隣接領域まで入り込む。このような場合、各集光スポットどうしは形状が類似しており、どのマイクロレンズによるものであるのかを判別できないため、スポットの変位の算出を適切におこなうことができず計測された位相勾配には誤りが生じる。すなわち、SHWFS の位相勾配に対するダイナミックレンジの上限は各マイクロレンズの口径により決まるといえる。これまで SHWFS のダイナミックレンジ拡大手法として、いくつかのマイクロレンズを遮蔽して順次遮蔽箇所を変えながら計測をおこなう手法 [63, 64] や、動的に変動する波面に対して時系列に連続して取得した集光スポットのフレーム間の変動を追跡する手法 [65] などが提案されてきたが、これらの手法は計測にある程度の時間を要するたためリアルタイム計測に不向きである。また、集光スポット探索アルゴリズムの改良により各スポットと検出域との対応付けを正確におこなう手法 [66–69] も種々提案されているが、解析アルゴリズムが非常に複雑になってしまう。

本研究では機能性位相変調パターンを SHWFS に適用し、集光スポットではなく識別可能なパターン像を取得することにより、シングルショットで従来の SHWFS のダイナミックレンジを越えるような大きな収差をもつ波面を計測可能にする手法を提案する。類似手法として、方位の異なる非点収差マイクロレンズを用いた手法 [70, 71] が提案されているが、本手法ではさらに解析アルゴリズムにパターンマッチング処理を応用することにより、より簡易な計算で波面計測が可能である。すなわち、本手法ではシステムの構造と位相勾配の解析アルゴリズムの両面を工夫することにより、位相勾配に対するダイナミックレンジの観点から SHWFS の性能向上を図る。

1.2.3 3次元ディスプレイの現状と課題

近年、映像表現として2次元情報のみならず奥行き情報も用いることにより、高い臨場感を得ることができる立体視技術である3次元ディスプレイが注目を集めている。特に、身近なところでは立体テレビや立体映画など娯楽用途の3次元映像コンテンツの流通によって一般的にも3次元ディスプレイに接する機会が増加してきており、将来的には広告、医療、教育などの分野へも応用が期待されている。現在用いられている3次元ディスプレイは、レンチキュラレンズや視差バリアを用いたもの、偏光方式やアクティブシャッター方式など眼鏡が必要なものに代表される両眼視差を利用した方式が一般的である [72]。しかしながら、これらの方式はいずれも実際に眼が焦点を合わせている面と立体像を知覚する面が異なり、これが疲労や気分の悪化の原因となっている。これに対し、像再生方式と呼ばれる上述の欠点のない理想的な立体視技術が研究されている。像再生方式には、レンズアレイなどを用いて取得した物体からの光線情報を再生するインテグラルイメージング [73, 74] や、物体からの波面そのものを再生するホログラフィックディスプレイ [75, 76] がある。原理上、インテグラルイメージングがレンズアレイにより離散化された情報しか再生できないのに対し、ホログラフィックディスプレイは視差の連続した完全な3次元映像を観察することができる。

ホログラフィックディスプレイでは、観察する物体から発せられる光波の複素振幅分布を再現することにより立体視が実現される。これは、静止画であればホログラフィックフィルムなどに記録されたホログラムから再生される物体像として得ることができるが、現像処理など煩雑な作業が必要になるほか、再生される物体像の切り替えが困難であるため、動画を表示する3次元ディスプレイとして現実的ではない。このため、ホログラフィックディスプレイは通常、Fig. 1.7 に示すように SLM にホログラムを表示することにより実現される。このとき、ホログラムの複素振幅分布を表示

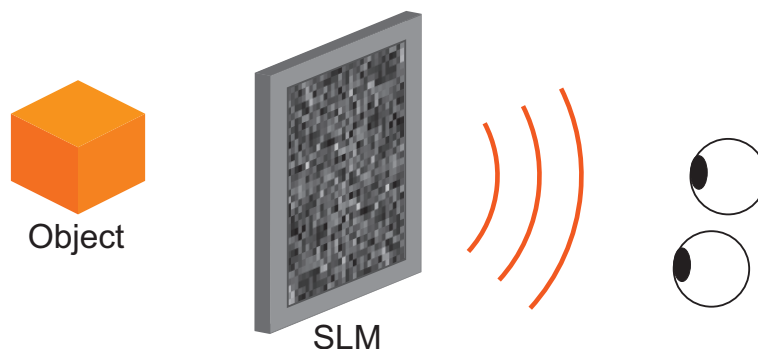


Fig. 1.7 ホログラフィックディスプレイの概念図

することが理想的であるが、現状では振幅分布および位相分布を同時に変調できるような素子は存在しないため、A-SLM もしくは P-SLM を用いて、振幅情報のみのホログラムもしくは位相情報のみのホログラムで物体からの光波の複素振幅分布を再現する必要がある。A-SLM を用いる場合、所望の再生像のほかに 0 次回折像と共役像が発生するという問題がある。これらは物体の立体視には不要な光波であり、これらを除去するための余分な光学系が必要になる上、利用可能な SLM の空間周波数帯域が制限されてしまう。さらに、入力光エネルギーの大部分を不要光として除去するため、光利用効率の面でも優れているとはいえない。それに対し、位相変調光波では振幅情報のみの場合のような不要な光波は発生せず、入力光エネルギーの損失もほとんどないため、P-SLM を用いたホログラフィックディスプレイが広く研究されている。しかし、位相情報のみでホログラムを表現する際には、本来は分布があるはずのホログラムの振幅情報を一様としてあつかうため、振幅情報の欠如に起因した再生像の画質低下の問題が生じる。この問題を解決するため、さまざまな物体像の画質改善手法 [77,78] が提案されているが、中でも再生面における物体の位相分布が変化するように作製した複数のホログラムを時系列に高速に切り替えて P-SLM に表示し、これらから再生される再生像強度を時間積分することによりスペックルを平均化する手法 [79,80] が広く用いられている。この手法は、切り替えるホログラムの数が増加するほど物体像の画質が向上するが、眼の応答速度に対して違和感のない周波数でホログラムの表示を切り替える必要があるため、P-SLM のリフレッシュレートがボトルネックとなる。また、切り替えるホログラムの数や画素数が増加するほど膨大なデータ量となり、これもホログラフィックディスプレイにおける大きな問題である。

本研究では、ホログラフィックディスプレイにおいて 2 値位相ホログラムを導入し、ホログラムの高速書き替えとデータ量の低減を図る。ホログラムの位相値の 2 値化のために情報量が不足し再生される再生像の画質が低下するが、ホログラムの位相分布の最適化をおこなうことによりこれを低減する。これにより、ホログラムのデータ量を抑えつつ、高画質な物体像をなめらかな動画として表示することが可能である。

1.3 本論文の構成

本論文の構成の概略を Fig. 1.8 に示し詳述する。本研究では、光ストレージ分野、波面計測分野、3 次元ディスプレイ分野の三つの分野を取り上げ、機能性位相変調パターンを用いてそれらの性能・機能の向上を目指す。

第 2 章では、まず空間位相変調光波を用いたコアキシャルホログラフィックメモリの原理について述べ、従来手法の課題とその解決の指針を光利用効率の観点から詳

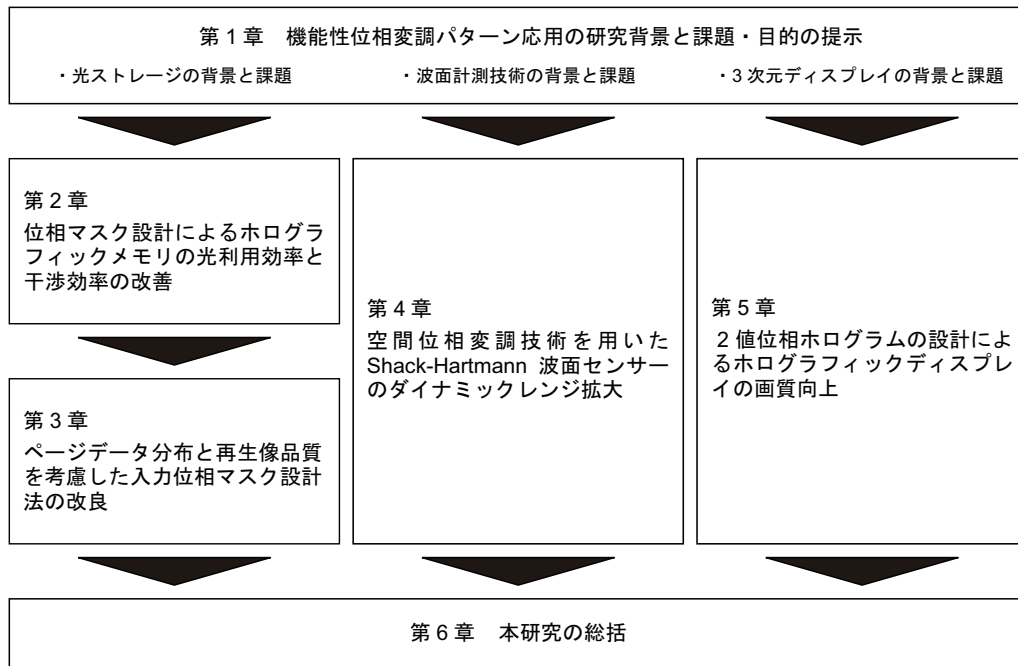


Fig. 1.8 本論文の構成

述する。次に、参照位相マスクおよび入力位相マスクの設計方法について詳細に説明する。さらに、本手法により設計された両位相マスクを用いたコアキシャルホログラフィックメモリの光利用効率を数値的に従来手法と比較し、提案手法の有用性を示す。第3章では、まず第2章で提案した入力位相マスク設計法の問題点について指摘した後、これを改善するために導入したセル法と隣接画素間位相差の拘束条件について詳述する。さらに、改良した設計法によって設計された入力位相マスクを用いて記録・再生シミュレーションをおこない、得られた再生像の品質と信号光の空間周波数分布のふるまいから最適な入力位相マスク設計条件を決定する。第4章では、波面計測技術である Shack-Hartmann 波面センサーに空間位相変調技術を応用することにより、そのダイナミックレンジを拡大させる手法について述べる。まず、提案手法のダイナミックレンジ拡大原理として、要素技術であるマイクロホログラムアレイと相関ピーク変位検出法について詳述する。次に、提案手法と従来手法を波面計測光学実験およびシミュレーションにより比較し、提案手法によるダイナミックレンジ拡大を実証する。第5章では、ホログラフィックディスプレイの再生像画質向上とデータ量低減のために、ホログラムの2値位相分布を最適化する手法について述べる。まず、2値位相ホログラムの設計法について詳述した後、設計されたホログラムからの物体像の数値再生シミュレーションにより最適化の効果を実証する。さらに、光学再生実験による物体像の画質評価について述べ、提案手法によるホログラフィックディスプレイの再生像画質向上とデータ量低減を実証する。最後に、第6章で本論文の総括を述べる。

第 2 章 位相マスク設計によるホログラフィックメモリの光利用効率・干渉効率改善

2.1 緒言

コアキシャルホログラフィックメモリでは、従来からランダム位相マスクを用いて信号光と参照光に空間位相変調を与えることにより記録メディア面における空間周波数分布を拡散させ、光強度の局在化を低減して干渉効率を改善していた。しかし、記録密度向上のために Nyquist 開口により空間周波数帯域を制限した結果、開口外の領域に存在する光波は除去されるため、光利用効率が高いとはいえなかった。この問題を改善するため、任意の帯域に空間周波数が分布するように参照光および信号光を制御可能な位相マスクをそれぞれの光波に対して独立に設計する [81]。設計された参照位相マスクおよび入力位相マスクを用いて空間位相変調を与えることにより、開口により除去される光波を低減することができるため光利用効率が向上するほか、記録領域内の空間周波数分布のばらつきが低減するため干渉効率の向上が期待できる。

本章では、まずコアキシャルホログラフィックメモリにおいて、従来から用いられてきたランダム位相マスクの効果と光利用効率に関する問題点について述べる。次に、参照位相マスクおよび入力位相マスクの設計法について、その設計指針および設計手順を詳述する。さらに、設計された各位相マスクをシミュレーションにより数値的に評価した後、これらを適用したコアキシャルホログラフィックメモリによる記録・再生光学実験をおこない、提案手法によるデータの記録を実証する。

2.2 空間位相変調光波を用いたコアキシャルホログラフィックメモリ

2.2.1 位相マスクによる空間周波数分布の光強度局在化低減作用

コアキシャルホログラフィックメモリでは信号光と参照光が入力面の Fourier 変換面近傍で干渉することによりホログラムが記録される。しかし、Fig. 1.2 のように振幅のみが変調された信号光と参照光の空間周波数分布は Fig. 2.1 のように直流成分に強度が集中し交流成分の強度が低い。このように局在した高強度の箇所では記録メディアが浪費され、ページデータの分布情報をもつ交流成分の干渉信号強度が低下するため、適切なホログラムを形成することができない。従来手法では Fig. 2.2 に示すような光学系を用いて、光波に空間的なランダム位相変調を付加することによりこの

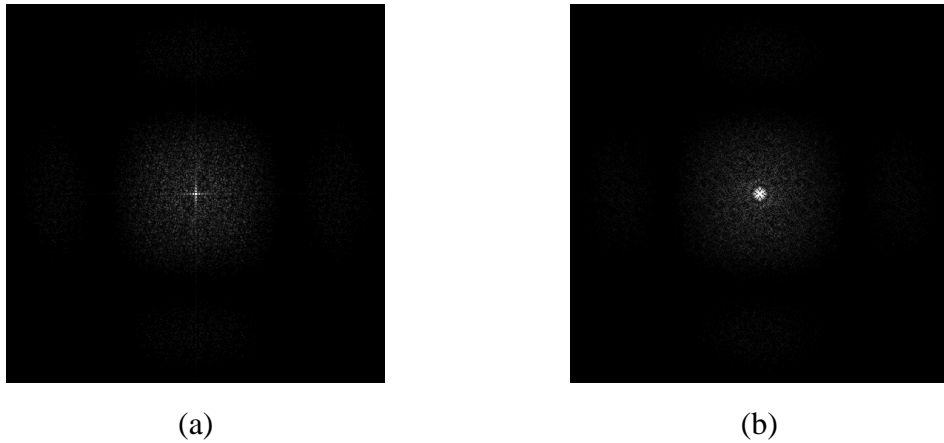


Fig. 2.1 振幅変調光波の空間周波数分布; (a) 信号光; (b) 参照光

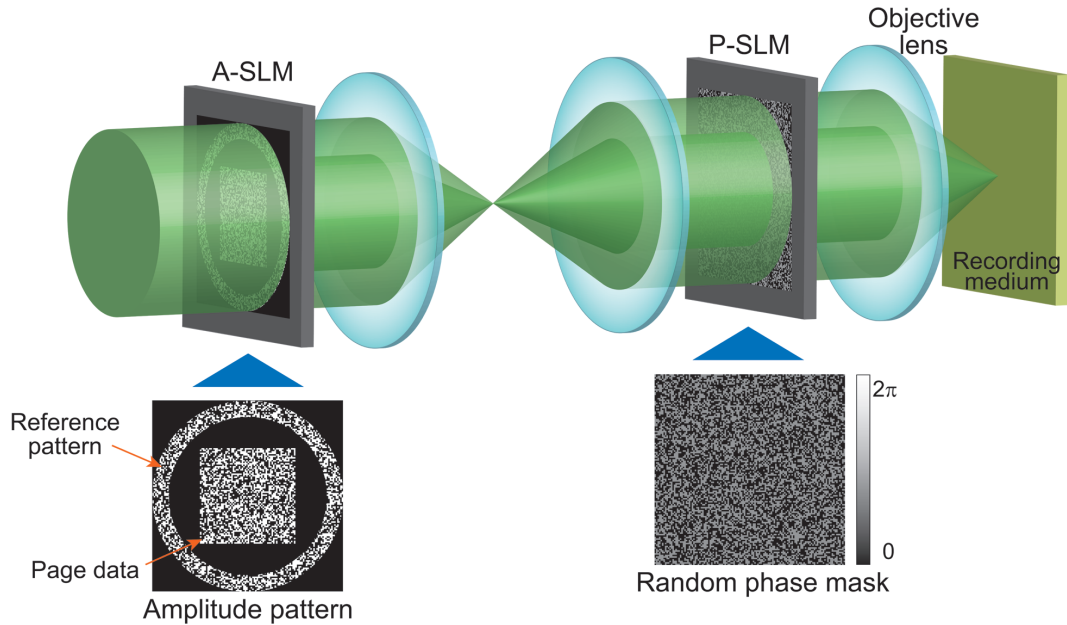


Fig. 2.2 空間位相変調光波を用いたコアキシアルホログラフィックメモリの概念図

問題の改善を図っていた。これは、 $4-f$ 光学系による A-SLM 面の共役面に位相板や P-SLM などにより実現されたランダム位相マスクを配置したものである。文献 [33] では各セルの大きさがページデータのセルの大きさに等しく、位相値が $0, \pi$ の2値であるランダム2値位相マスクを微細加工された位相板により実現している。ランダム2値位相マスクの効果により、信号光および参照光の空間周波数分布は Fig. 2.3 のように直流成分が低減し、より高周波領域まで拡散される。このように、位相マスクを用いて信号光と参照光に空間的な位相変調を与えることにより、光強度の局在化を低減してメディアの浪費を抑制し、二光波の干渉効率を向上させることができる。

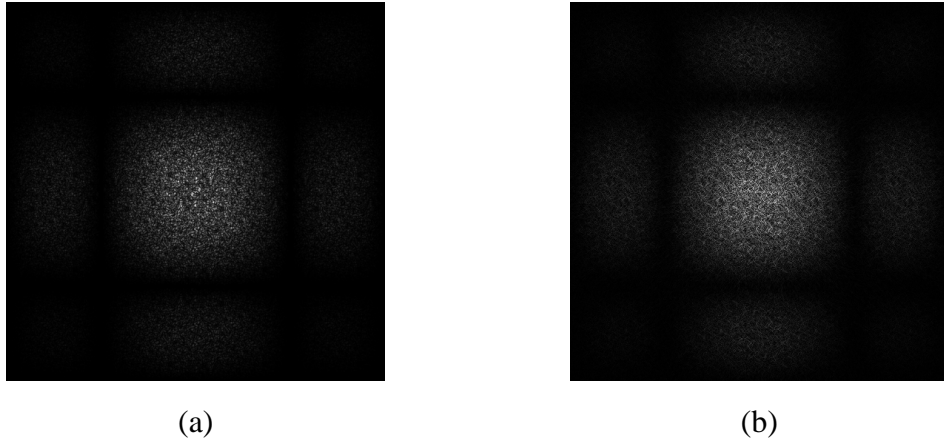


Fig. 2.3 ランダム 2 値位相マスクにより空間位相変調された (a) 信号光、および (b) 参照光の空間周波数分布

2.2.2 空間周波数分布と Nyquist 開口

コアキシャルホログラフィックメモリでは、信号光と参照光はそれぞれともに対物レンズにより Fourier 変換され、Fourier 変換面近傍で記録メディアに照射される。このため、これらの光波の空間周波数帯域の大きさが記録されるホログラムサイズを決める要素となり、これを縮小することにより記録密度の向上が可能である。これは BD などの平面ビット記録型光ディスクの記録密度向上原理と同様であり、多重記録が可能なホログラフィックメモリにおいても、単一ホログラムが占有する領域は小さいほうが効率的に記録メディアを利用でき、記録密度向上につながる。ホログラムサイズは基本的に信号光の空間周波数帯域、すなわち記録するページデータのセルの大きさによって決まる。A-SLM に表示するページデータの面積が等しければ、セルの大きさを小さくすることによりページデータあたりの容量は増加する。しかし、セルを小さくすればページデータの空間周波数が高くなるため、Fourier 変換面における空間周波数帯域は拡大してしまう。すなわち、信号光の空間周波数帯域の縮小とページデータの大容量化による記録密度向上は相反する関係にある。ページデータを再現可能な空間周波数は Nyquist サイズ W として

$$W = \frac{\lambda f}{d} \quad (2.1)$$

であらわされる [82]。ここで、 λ は波長、 f は対物レンズの焦点距離、 d はページデータ中のセルの一辺の大きさである。Fig. 2.3 に示す空間周波数分布の場合、Nyquist サイズは Fig. 2.4 中の破線で示す大きさである。実際には、記録メディア面において信

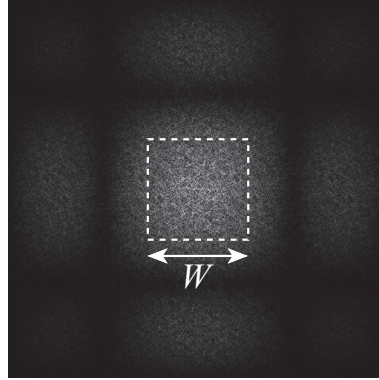


Fig. 2.4 Nyquist 開口サイズ

号光および参照光の空間周波数分布が拡がりすぎないように、Nyquist サイズに基づいた大きさの開口を設けて不要な光波を除去することにより記録メディアの浪費を防止している．文献 [33] では Nyquist サイズの 2 倍（以降， $2W$ と表記する）の開口を用いていることが報告されている．しかしながら，開口により除去される光波は光源エネルギーの損失であるといえ，より効率的に光源エネルギーを利用するためには空間周波数分布を用いる開口サイズ内に集中させる必要がある．

2.2.3 位相マスクのはたらきと設計の指針

位相マスクを用いたコアキシャルホログラフィックメモリについて，信号光と参照光の空間周波数分布のふるまいを考えるため，これらの光波が Fourier 変換面上のみで干渉する平面ホログラムであると仮定する．また，ランダム位相マスクとは異なり，信号光と参照光には独立した位相マスクを付加することを考え，信号光および参照光に付加される位相マスクをそれぞれ入力位相マスク，参照位相マスクと呼ぶことにする．A-SLM に表示されるページデータを $p(x, y)$ ，参照光パターンを $r(x, y)$ ，P-SLM に表示される入力位相マスクを $a_{\text{in}}(x, y)$ ，参照位相マスクを $a_{\text{ref}}(x, y)$ とすると，A-SLM と P-SLM により変調された光波の複素振幅分布 $u(x, y)$ は

$$\begin{aligned}
 u(x, y) &= p(x, y)\exp\{ia_{\text{in}}(x, y)\} + r(x, y)\exp\{ia_{\text{ref}}(x, y)\} \\
 &= p(x, y)\exp\{ia_{\text{in}}(x, y)\} + h(x, y)
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

となる．ただし， $r(x, y)$ ， $a_{\text{ref}}(x, y)$ は不変であるとして

$$h(x, y) = r(x, y)\exp\{ia_{\text{ref}}(x, y)\} \tag{2.3}$$

を用いている．この光波は対物レンズによって Fourier 変換され，Fourier 変換面上で生じる干渉縞の強度分布は

$$\begin{aligned}
 I(\mu, \nu) &= |\mathcal{F}[u(x, y)]|^2 \\
 &= |P(\mu, \nu) \otimes A(\mu, \nu) + H(\mu, \nu)|^2 \\
 &= |P(\mu, \nu) \otimes A(\mu, \nu)|^2 + |H(\mu, \nu)|^2 + \{P(\mu, \nu) \otimes A(\mu, \nu)\}^* H(\mu, \nu) \\
 &\quad + \{P(\mu, \nu) \otimes A(\mu, \nu)\} H^*(\mu, \nu)
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

となる．ここで， $\mathcal{F}[\]$ は Fourier 変換演算子， \otimes は畳み込み積分演算子をあらわしており， $P(\mu, \nu)$ ， $H(\mu, \nu)$ ， $A(\mu, \nu)$ はそれぞれ $p(x, y)$ ， $h(x, y)$ ， $\exp\{ia_{\text{in}}(x, y)\}$ の空間周波数分布である．すなわち，Fourier 変換面では信号光はページデータと入力位相マスクの各複素振幅分布の空間周波数分布どうしの畳み込み積分，参照光は自身の空間周波数分布となり，それらが干渉し合うことによりホログラムが記録される．

再生時にはホログラムに参照光 $h'(x, y)$ を照射するとして，ホログラム面上の光波は

$$\begin{aligned}
 I(\mu, \nu) H'(\mu, \nu) &= |P(\mu, \nu) \otimes A(\mu, \nu)|^2 H'(\mu, \nu) + |H(\mu, \nu)|^2 H'(\mu, \nu) \\
 &\quad + \{P(\mu, \nu) \otimes A(\mu, \nu)\}^* H(\mu, \nu) H'(\mu, \nu) \\
 &\quad + \{P(\mu, \nu) \otimes A(\mu, \nu)\} H^*(\mu, \nu) H'(\mu, \nu)
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

とあらわされる．ここで， $H'(\mu, \nu)$ は $h'(x, y)$ の空間周波数分布である．(2.5) 式中の第 4 項が再生像に寄与する項であるため，これのみを逆 Fourier 変換すると

$$\mathcal{F}^{-1}[\{P(\mu, \nu) \otimes A(\mu, \nu)\} H^*(\mu, \nu) H'(\mu, \nu)] = p(x, y) \exp\{ia_{\text{ref}}(x, y)\} \otimes h(x, y) \star h'(x, y) \tag{2.6}$$

となる．ここで， $\mathcal{F}^{-1}[\]$ は逆 Fourier 変換演算子， \star は相互相関演算子である．再生時の参照光が記録時と同条件，すなわち $h(x, y) = h'(x, y)$ であれば $h(x, y) \star h'(x, y)$ はデルタ関数となり，記録時の信号光が再生されることがわかる．さらに，撮像素子により再生像を取得すると位相項は消去され，記録時のページデータ $p(x, y)$ が得られる．

信号光と参照光はそれぞれの空間周波数分布が重なる領域で干渉するため，これらが分布する領域が異なれば，重ならない領域の光波は記録メディアの浪費につながるため開口を用いて除去する必要がある．このため光利用効率を高めるためには，これら二光波の空間周波数帯域は一致していることが望ましい．また，記録領域内で信号光と参照光の強度が一致するとき最も適切にホログラムが記録されるため，空間周波数分布は一様であるべきである．本研究では，位相マスクにより信号光と参照光がこれら二つの条件を満たすように制御することにより，光利用効率および干渉効率の向上を図る．

2.3 位相マスクの設計方法

2.3.1 位相マスクの最適化手法

光波に特定の空間位相変調を付加し伝搬させると、その伝搬面において所望の振幅分布が得られるように制御することができる。これは、回折光学素子（DOE : Diffractive Optical Elements）[83] や計算機合成ホログラム（CGH : Computer Generated Hologram）[84] として従来からさまざまな用途に応用されてきた。これらは光波の位相のみを変調するため、位相ホログラムとも呼ばれている。最も単純な位相ホログラムは、再生面において目標の入力振幅分布にランダム位相分布を付加し、ホログラム面まで逆伝搬することにより、ホログラム面上の複素振幅分布のうち振幅が一様とみなせることを利用して、その位相情報のみを取り出してホログラムとして用いるものである。しかし、実際には振幅は一様ではないため、位相ホログラム生成時の振幅情報の欠如により再生像の画質は低下する。Fourier 変換型の位相ホログラムにおいて、再生像画質を改善する手法として反復 Fourier 変換法（IFTA : Iterative Fourier Transform Algorithm）[85] が提案されている。以下にその手順の概略を述べる。上で述べた単純な位相ホログラムをさらに Fourier 変換し、その再生面における複素振幅分布のうち振幅情報のみを目標の振幅分布に置き換える。そして、これを再び逆 Fourier 変換してホログラム面において再度位相ホログラムを得る。この一連の計算を反復しておこなうことにより位相情報のみでも再生振幅分布のノイズを低減し、目標の振幅分布に近いパターンを得ることができる。しかしながら、この手法で生成されるものは位相ホログラムのすべての面内位置における位相を用いるものであり、コアキシャルホログラフィックメモリのリング状の参照光のように任意の形状の光波に合わせた位相ホログラムを生成することができない。

このような場合における位相ホログラム生成には、擬似焼きなまし法（SA : Simulated Annealing）[86] や遺伝的アルゴリズム（GA : Genetic Algorithm）[87] などの非線形最適化アルゴリズムが用いられている。これらは、いくつかの変数の組合せにより評価関数の解を探索するような組合せ最適化問題に対して、厳密解を求めるのが困難な場合に良好な近似解を求める手法である。ホログラフィックメモリにおいては、参照光生成のための空間振幅変調パターンの設計に SA が用いられた事例が報告されており [44]、本研究においてもこれに則り、位相マスク設計に SA に基づいた最適化アルゴリズムを適用する。最急降下法のような常に改良方向に解の探索を進める手法では、初期値の与え方により局所解に陥ることがあるが、SA は確率的に改悪方向の探索も認めることによりこれを防止し、最適解を求めることができるという利点がある。

2.3.2 参照位相マスクの設計

コアキシャルホログラフィックメモリの参照光は Fig. 2.5 に示すような振幅分布をもつリング状の光波であり、リング内で振幅は一樣であるものとする。このため、参照位相マスクにより空間位相変調された参照光の複素振幅分布は

$$h(x, y) = \begin{cases} \exp\{ia_r(x, y)\} & (\text{within ring area}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2.7)$$

とあらわすことができる。ここで、 $a_r(x, y)$ は参照位相マスクの位相分布であり、画素ごとに離散化された画像データである。設計では参照位相マスク上の各画素の位相値を変数とし、画素ごとに位相値を変化させたとき、参照位相マスクにより空間位相変調された参照光の空間周波数の評価領域内の振幅分布が、目標状態からどれだけ離れているかを評価する。評価関数 E_r は

$$E_r = \sum_{\text{within evaluation area}} \{|\text{FFT}[h(x, y)]| - C_r(\mu, \nu)\}^2 \quad (2.8)$$

と定める。ここで、 $\text{FFT}[\]$ は高速 Fourier 変換演算子をあらわしている。また、 $C_r(\mu, \nu)$ は空間周波数の振幅分布の目標状態を示しており、評価領域内では振幅が一樣かつ入射光波の全エネルギーがこの領域内に集中する状態である。評価領域は参照光の空間周波数帯域に相当し、任意に設定が可能である。ここでは、評価領域を Fig. 2.6 に示すような円形の領域とした。参照位相マスク上の位相値は $[0, 2\pi)$ の範囲を任意の階調数で量子化された値をとるものとする。ただし、階調数の上限は参照位相マスクを表示する P-SLM に依存し、通常は 256 階調 (8 bit) である。参照位相マスクの初期状態は、Fig. 2.7 のようにリング内に設定した階調数の位相値がランダムに分布した状態とする。設計アルゴリズムの手順を Fig. 2.8 に示す。評価関数の初期値 E_0 は (2.8) 式中の $h(x, y)$ を Fig. 2.7 の位相分布として計算した値であり、 E_n は n 番目の画素の変化

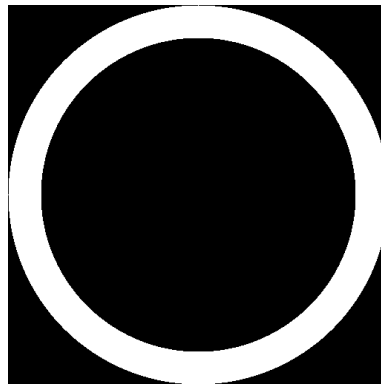


Fig. 2.5 参照光の振幅分布

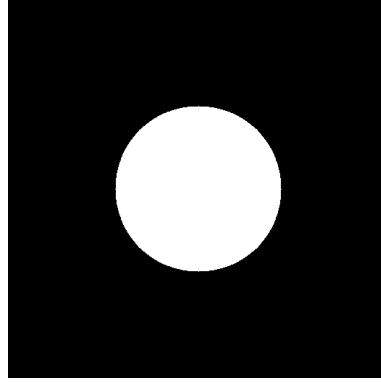


Fig. 2.6 参照光の空間周波数の目標振幅分布

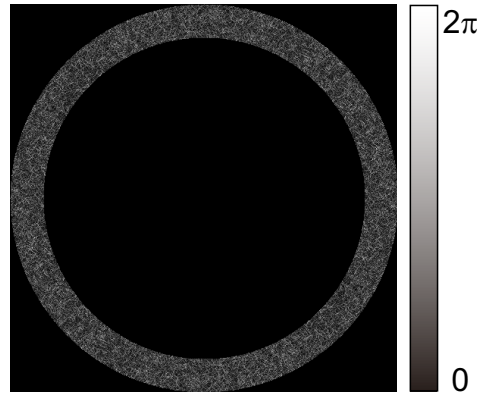


Fig. 2.7 参照位相マスクの初期状態

に対する評価関数の値である．位相値探索の対象はリング内の画素すべてとし，1画素ずつ位相値を変化させた際に評価関数が減少すればその変化を採用とする．ただし，評価関数が増加した場合も確率変数 p がしきい値よりも小さくなれば採用とする．採用されなかった場合はその画素の位相値を元の値に戻す．この一連の処理を対象となるすべての画素に対しておこなったとき1回の計算が完了したこととする．2回目以降の評価関数の初期値は，それまでの計算で設計された最新の参照位相マスクの状態を用いて計算した値とする．この計算は1回の計算が終わるごとに終了条件を満たすかどうかを判定し，さらに反復する場合は確率変数 p を更新して，再び同じ処理をおこなう．ここで，確率変数 p は

$$p = \frac{1}{1 + \exp(1/T)} \quad (2.9)$$

とした．また，(2.9) 式中の T は

$$T = \frac{1}{\log(m+1)} \quad (2.10)$$

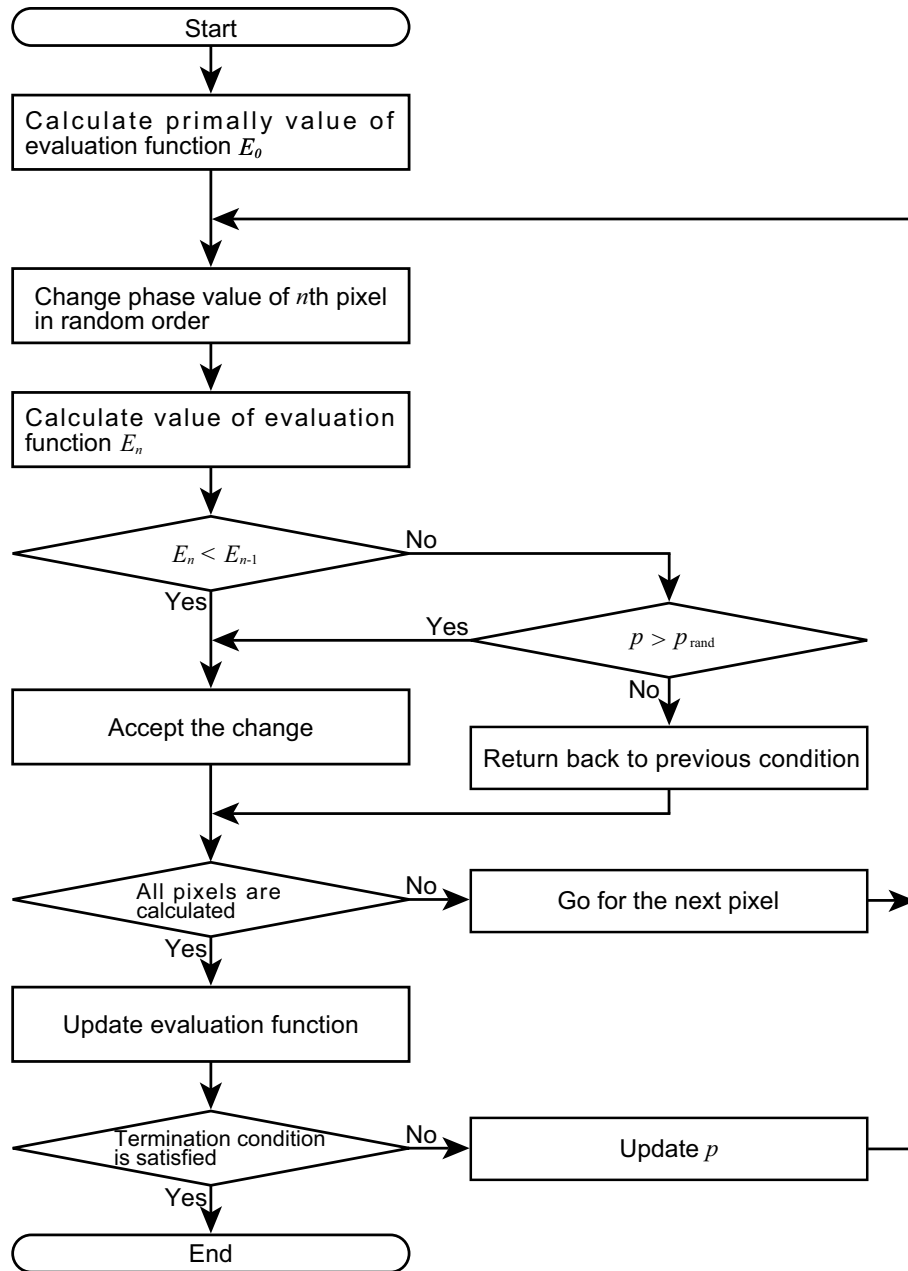


Fig. 2.8 位相マスク設計アルゴリズムのフローチャート

である．ここで m は反復計算回数である．また， p_{rand} は 0～1 でランダムに発生させる値である．つまり，反復回数が少ないうちは改悪方向への変化を採用する確率が高いが，反復を重ねるにつれてこの確率が低くなっていく．終了条件は，評価関数が単調減少から増加に転じた回数をカウントし，これが 20 回を越えたときとした．

2.3.3 入力位相マスクの設計

入力位相マスクも参照位相マスクと同様に SA に基づいて設計をおこなう．入力位相マスク $a_i(x, y)$ 上の位相値は $[0, 2\pi)$ の範囲を任意の階調数で量子化された値をとるものとし，評価関数 E_i は

$$E_i = \sum_{\text{within evaluation area}} \{|\text{FFT}[\exp\{ia_i(x, y)\}]| - C_i(\mu, \nu)\}^2 \quad (2.11)$$

と定める．ここで， $C_i(\mu, \nu)$ は空間周波数の振幅分布の目標状態を示しており，Fig. 2.9 に示すように，評価領域内では振幅値が一様であり，入射光波の全エネルギーがこの領域内に集中する状態である．評価領域は任意に設定可能であるが，2.2.3 項で述べたように信号光の空間周波数分布はページデータと入力位相マスクそれぞれの空間周波数分布の畳み込み積分であらわされ，入力位相マスク設計時の空間周波数帯域より拡がる．このため，入力位相マスクの空間周波数帯域は参照位相マスク設計時の帯域以下の大きさに設定する必要がある．入力位相マスクの初期状態は Fig. 2.10 に示す

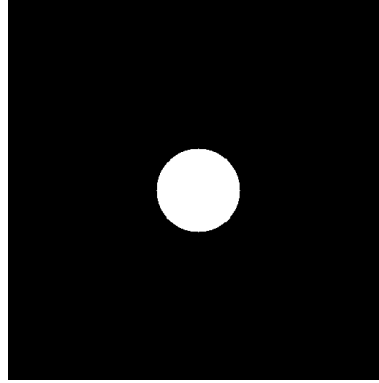


Fig. 2.9 入力位相マスクの空間周波数の目標振幅分布

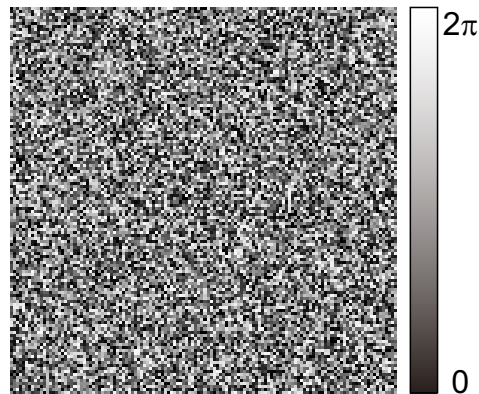


Fig. 2.10 入力位相マスクの初期状態

ランダムな位相分布とする．それ以外は，入力位相マスクも参照位相マスクと同様に Fig. 2.8 に示す設計アルゴリズムの手順に基づいて設計される．すなわち，参照位相マスクの設計と異なるのは位相値探索の対象となる範囲であり，参照位相マスクではリング上の画素のみを対象としていたのに対し，矩形のページデータを用いる場合，入力位相マスクは画像内の画素の位相値すべてを評価対象として設計される．

2.4 設計された位相マスクの数値的評価

2.4.1 空間周波数分布による位相マスクの性能評価

2.4 節で述べた設計アルゴリズムを用いて参照位相マスクを設計した．参照位相マスクの一例として，画素数を 256×256 ，階調数を 2，空間周波数帯域を Fig. 2.6 に示す領域として設計したもの，およびこれにより空間位相変調された参照光の空間周波数分布を Fig. 2.11 に，評価値の推移を Fig. 2.12 に示す．評価値は 20 回程度の反復回数でほぼ収束しているといえ，Fig. 2.11 (b) から，設定した帯域内に空間周波数がほぼ均一な強度で分布し，それ以外の帯域ではほとんど強度をもたないことがわかる．位相マスクの性能は，空間周波数分布から光利用効率と帯域内強度の変動係数を算出し，これらを指標として評価する．光利用効率 LE は

$$LE = \frac{\sum_A I(x,y)}{\sum I(x,y)} \quad (2.12)$$

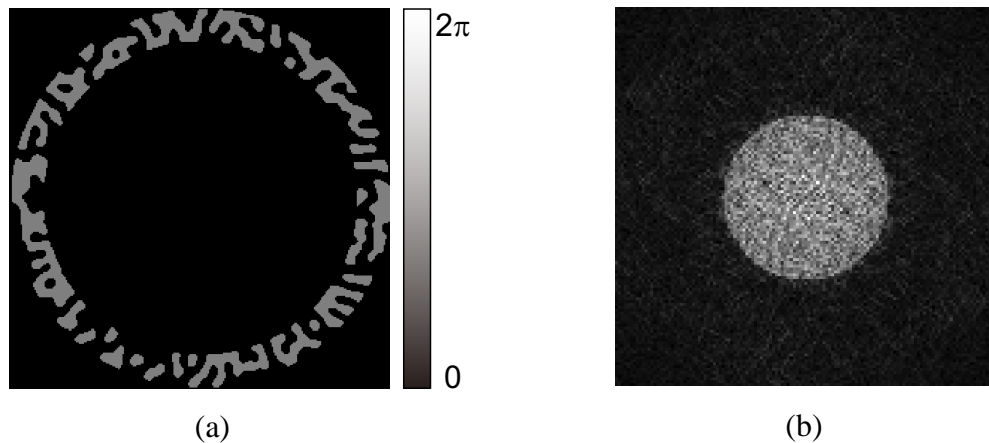


Fig. 2.11 (a) 設計された参照位相マスク; (b) (a) により空間位相変調された参照光の空間周波数分布

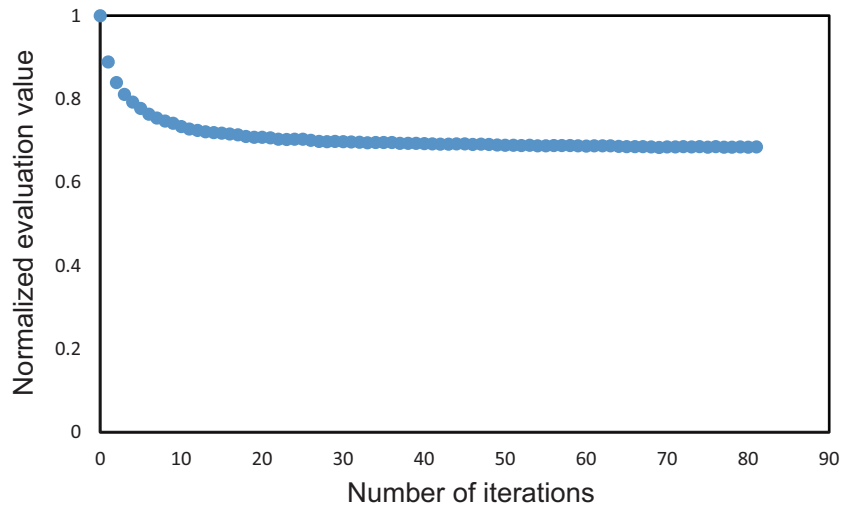


Fig. 2.12 参照位相マスク設計における評価値の推移

と定義する．ここで， $I(x, y)$ は空間周波数の強度分布であり， A は設計時に設定した帯域である．また，変動係数 CV は

$$CV = \frac{\sigma_A}{\bar{I}_A} \quad (2.13)$$

と定義し，これは空間周波数分布の強度のばらつきの大きさをあらわしている．ここで， σ_A は帯域 A 内の空間周波数分布の強度の標準偏差， \bar{I}_A はその平均値である．位相値の階調数を変えて設計した参照位相マスクの光利用効率および帯域内の空間周波数分布の強度の変動係数を，それぞれ従来のランダム位相マスクと比較した結果を Table 2.1 に示す．2 階調で設計された参照位相マスクは 256 階調のものに比べ，文献 [88] にも述べられているように，光利用効率，空間周波数分布のばらつきともにやや劣るが，32 階調では 256 階調で設計されたものと同程度の性能を有しており，この程度の階調数があれば所望の空間周波数分布の制御は可能であるといえる．また，従来手法では光利用効率は高いが，帯域内の空間周波数分布の強度のばらつきが提案手法に比べ大きいことがわかる．これにより，提案手法は光利用効率を確保すると同時に従来手法より信号光との干渉効率を向上させることが可能であるといえる．

Table 2.1 各階調で設計された参照位相マスクとランダム 2 値位相マスクの比較

	Proposed					Conventional
Gray scale level	2	32	64	128	256	2
Light use efficiency	0.73	0.81	0.81	0.82	0.82	0.87
Coefficient of variation	0.53	0.50	0.49	0.51	0.49	2.79

また、入力位相マスクについても同様の評価をおこなう。画素数を 128×128 、階調数を 32、空間周波数帯域を Fig. 2.9 に示す領域として設計された入力位相マスクの一例とその空間周波数分布を Fig. 2.13 に、評価値の推移を Fig. 2.14 に示す。評価値は 30 回程度の反復回数でほぼ収束しており、参照位相マスクと同様に設計時の帯域内に空間周波数をほぼ均一な強度で集中させていることがわかる。提案する入力位相マスクと従来のランダム位相マスクを比較した結果を Table 2.2 に示す。従来のランダム位相マスクに比べ、提案手法は光利用効率、空間周波数分布の強度のばらつきともに優れていることがわかる。これらの結果から、提案する参照位相マスクおよび入力位相マスクの設計法が光利用効率、二光波の干渉効率の観点から有用であることを実証した。

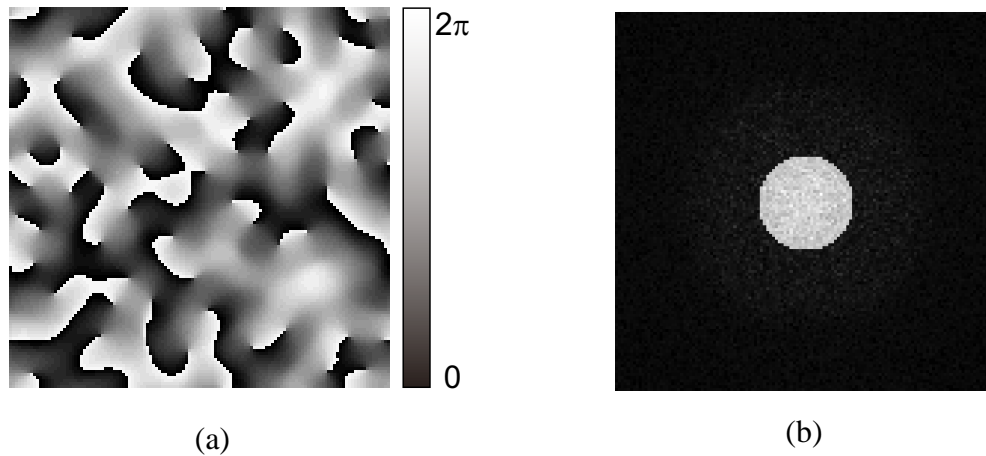


Fig. 2.13 (a) 設計された入力位相マスク; (b) 入力位相マスクの空間周波数分布

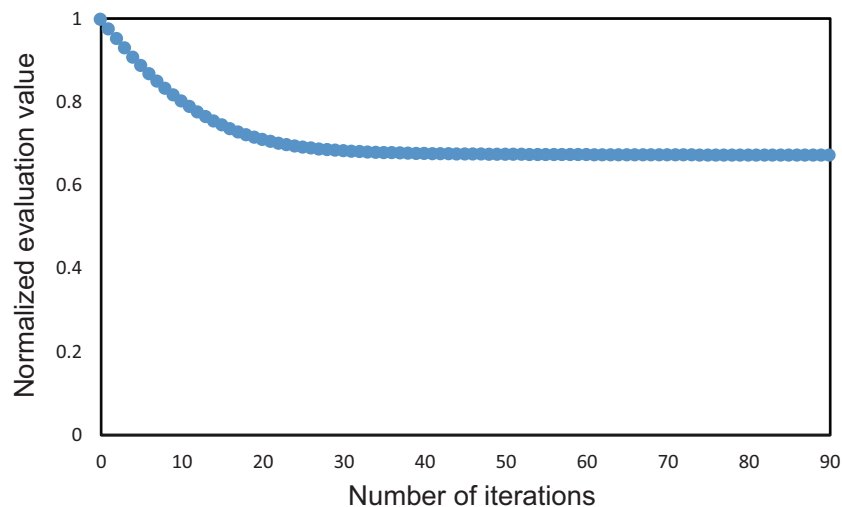


Fig. 2.14 入力位相マスク設計における評価値の推移

Table 2.2 設計された入力位相マスクとランダム位相マスクの比較

	Proposed	Conventional
Light use efficiency	0.95	0.89
Coefficient of variation	1.79	2.81

2.4.2 記録・再生シミュレーションによる位相マスクの検証

設計された参照位相マスクと入力位相マスクを用いた記録・再生シミュレーションをおこなった。シミュレーションには、ボリュームホログラフィックメモリシミュレーター [89] に基づいたシミュレーションアルゴリズムを用いた。本シミュレーションは Fig. 2.15 に示すシミュレーションモデルを想定しておこない、入力面には Fig. 2.16 に示す振幅変調パターンおよび位相変調パターンによる複素振幅分布を配置した。このうち、参照位相マスクおよび入力位相マスクにはそれぞれ Fig. 2.11 (a), Fig. 2.13 (a) に

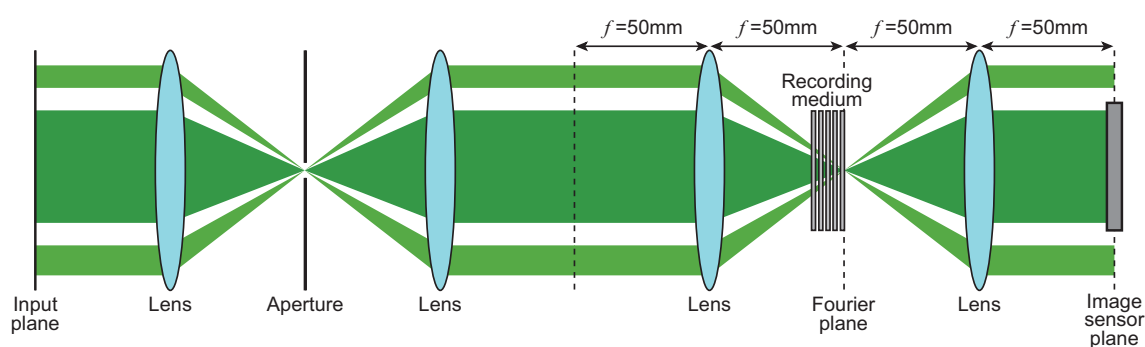


Fig. 2.15 記録・再生シミュレーションモデル

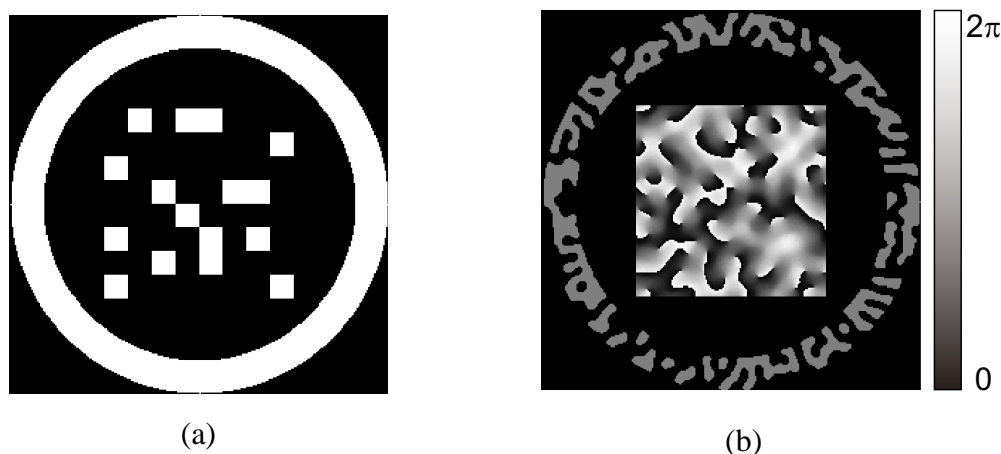


Fig. 2.16 記録・再生シミュレーションにおける入力画像: (a) 振幅変調パターン; (b) 位相変調パターン

示すものをそれぞれ用いた。また、その他のシミュレーションパラメータを Table 2.3 に示す。開口は参照位相マスク設計時に設定した帯域外の空間周波数を除去するために用いた。シミュレーションにより得られた再生像を Fig. 2.17 に示す。

ホログラフィックメモリの再生データとして得られた再生像は SNR とシンボル誤り率 (SER : Symbol Error Rate) で評価される。SNR は記録されたホログラムから再生された再生像の品質を評価する指標であり、

$$\text{SNR} = \frac{\mu_{\text{ON}} - \mu_{\text{OFF}}}{\sqrt{\sigma_{\text{ON}}^2 + \sigma_{\text{OFF}}^2}} \quad (2.14)$$

で定義される [90]。ただし、 μ_{ON} , μ_{OFF} はそれぞれ再生像において元の記録したページデータの ON セルと OFF セルに対応する画素の強度平均値であり、 σ_{ON}^2 , σ_{OFF}^2 はそれぞれの強度分散値である。すなわち、ON セル内画素の強度が高く、OFF セル内画素の強度が弱い、かつそれぞれのセル内強度のばらつきが小さければ SNR は向上する。SER は再生像からデータの最小単位であるシンボルを読み出す際に、誤って読み

Table 2.3 設計された位相マスクを用いた記録・再生シミュレーションの条件

Wavelength of light source	532 nm
Number of calculation pixels	512×512
Pixel size of SLM	20 μm
Focal length of objective lens	50 mm
Thickness of medium	400 μm
Resolution in depth direction	4 μm
Refractive index of medium	1.50
Maximum refractive index modulation	10^{-4}

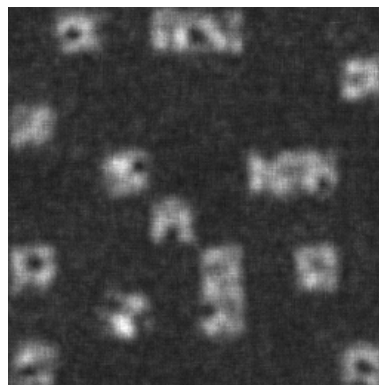


Fig. 2.17 記録・再生シミュレーションにより取得された再生像

出されたシンボルの割合を評価する指標であり，

$$\text{SER} = \frac{E_{\text{symbol}}}{N_{\text{symbol}}} \quad (2.15)$$

で定義される．ただし， N_{symbol} はページデータ中に含まれる全シンボル数， E_{symbol} は誤って読み出されたシンボルの数をあらわしている．SER は 0 であることが望ましいが，再生像品質の低下により誤りが生じる恐れがある．しかし，誤り訂正符号 [91] を導入することにより 5% 程度の誤りは許容可能である．Fig. 2.17 の再生像の SNR は 1.74 であり，再生像から読み出されたデータの SER は 0 であった．これにより，提案する位相マスク設計法により設計した参照位相マスクおよび入力位相マスクを用いたページデータの記録・再生が実証された．

2.5 記録・再生光学実験

設計された参照位相マスクおよび入力位相マスクを用いたコアキシャルホログラフィックメモリによる記録・再生光学実験をおこなった．実験に用いた光学系を Fig. 2.18 に示す．入力画像としてシミュレーションと同様に，A-SLM には Fig. 2.16 (a) に示すパターンを，P-SLM には Fig. 2.16 (b) に示すパターンをそれぞれ表示し，所望の複素振幅分布をもつ参照光および信号光を生成した．その他の実験パラメータを Table 2.4 に示す．ここで，A-SLM と P-SLM は画素サイズが異なるため，焦点距離

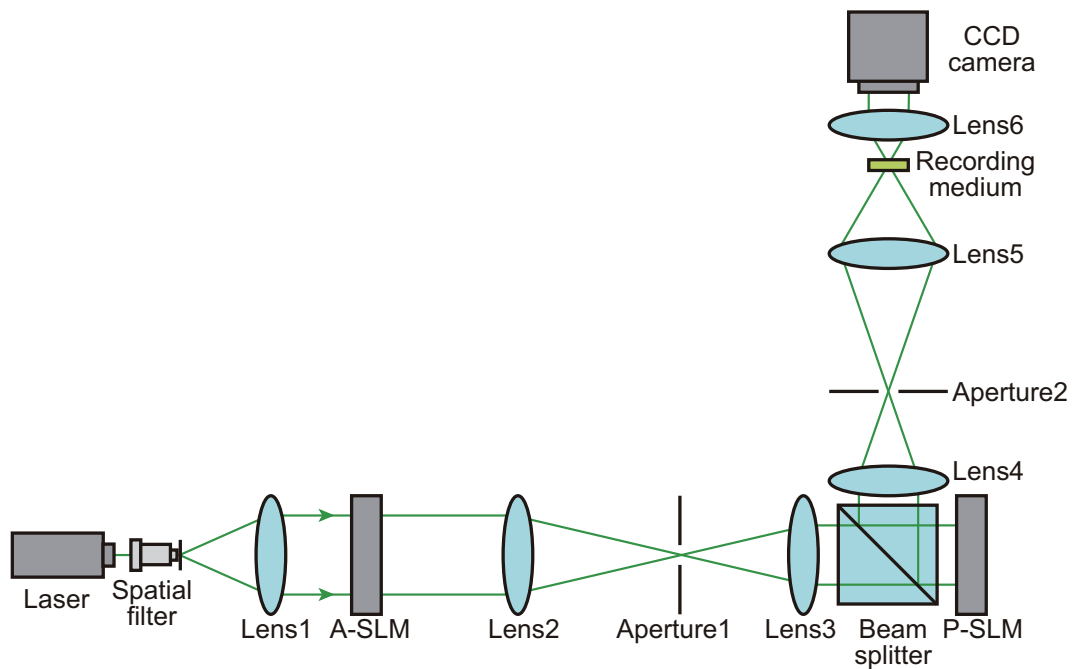


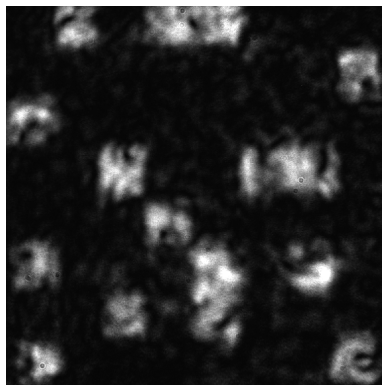
Fig. 2.18 コアキシャルホログラフィックメモリの実験光学系

Table 2.4 設計された位相マスクを用いた記録・再生実験の条件

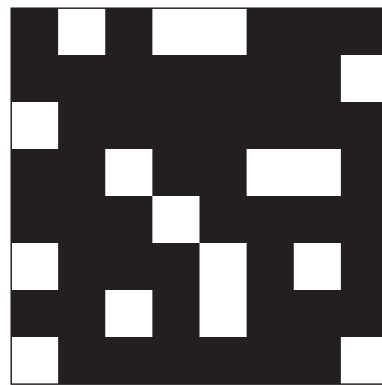
Wavelength of light source	532 nm
Number of pixels of A-SLM	800×600
Pixel size of A-SLM	32 μm
Number of pixels of P-SLM	792×600
Pixel size of P-SLM	20 μm
Number of pixels of CCD camera	1280×960
Pixel size of CCD camera	4.65 μm

400 mm の Lens2 と焦点距離 250 mm の Lens3 による縮小光学系により，これらのサイズを一致させた．また，Aperture1 は A-SLM によって生じた不要な回折光を除去するために用い，Aperture2 では参照光および信号光の空間周波数に帯域制限をおこなった．本光学系では焦点距離 135 mm の Lens4 が対物レンズに相当し，その焦点面を結像レンズである Lens5 により記録メディア面に結像させた．このとき，高密度に記録できるように参照光と信号光の空間周波数分布が縮小される結像系配置とした．記録メディアには厚みが 200 μm ，屈折率が 1.52，最大屈折率変調量が 0.08 のフォトポリマーを用いた．

単一ページデータの記録・再生の結果，Fig. 2.19 (a) に示す再生像が得られた．この再生像の SNR は 1.31 であり，やや劣化しているが元のデータが十分確認できる再生像が得られていることがわかる．また，この再生像をしきい値処理することにより Fig. 2.19 (b) に示すデータが得られ，このデータの SER は 0 であった．この結果より，提案手法によって設計された参照位相マスクおよび入力位相マスクを用いて誤りなくページデータの記録・再生が可能であることを実験的に示した．



(a)



(b)

Fig. 2.19 記録・再生実験結果: (a) 再生像; (b) 復元されたデータ

2.6 結言

本章では、コアキシャルホログラフィックメモリの光利用効率および参照光と信号光の干渉効率向上のために、参照位相マスクと入力位相マスクの設計を提案した。ホログラフィックメモリでは記録メディアが対物レンズの Fourier 変換面に置かれるため、参照位相マスクと入力位相マスクの空間周波数分布が任意の帯域内に強度のばらつきなく分布するように評価関数を設定し、SA に基づいたアルゴリズムで位相マスクの設計をおこなった。これにより、設定する帯域に依存するが、従来のランダム位相マスクを用いる場合と比べて光利用効率を確保すると同時に空間周波数分布の強度のばらつきを低減できることを示した。また、設計した位相マスクを用いた記録・再生シミュレーションおよび光学実験をおこない、提案手法を用いたデータの記録を実証した。

しかしながら、信号光の空間周波数分布がページデータおよび入力位相マスクの空間周波数分布どうしの畳み込み積分であらわされる分布となる性質上、本章で提案した入力位相マスクでは、用いるページデータの振幅分布が変わるたびに信号光の空間周波数分布が変化する。つまり、信号光の空間周波数帯域を任意に設定することができず、参照光、信号光双方の空間周波数帯域の設定に曖昧性をもつことになる。これを解消するためには、参照光同様に信号光の空間周波数帯域も任意に設定できなければならないが、これを可能にする入力位相マスク設計法については第3章で述べる。

また、本章で述べた Fig. 2.8 に示す設計アルゴリズムでは、2次元の高速 Fourier 変換および2次元配列の各要素に対する種々の単純な四則演算が大部分を占めており、これらは位相マスク設計に要する時間のボトルネックである。特に、設計する位相マスクの画素数が増加すればするほどこれらの計算時間の増大は顕著であり、通常の CPU (Central Processing Unit) では現実的な時間で設計をおこなうことは困難である。そこで、GPU (Graphics Processing Unit) を利用した並列演算を導入することにより処理全体の高速化が可能である。CPU が通常 1~8 個程度の演算ユニットしかもたないのに対し、GPU は数百~数千個程度の演算ユニットを有し、非常に高い並列演算能力をもつため、高速 Fourier 変換など分岐のない単純な浮動小数点演算を繰り返す処理の高速化に効果的である [92]。このため、GPU は本来はディスプレイ装置への映像出力のための画像処理用途の演算装置であるが、近年ではこれを CGH 生成などの汎用演算に用いる技術 (GPGPU : General Purpose computing on GPU) が盛んに研究されている [93]。上に挙げたそれぞれの計算自体も同様の単純な演算を画素ごとにおこなうものであるため、各画素に対する演算を GPU を用いて並列に処理することにより大幅な高速化が可能である。

第 3 章 ページデータ分布と再生像品質を考慮した入力位相マスク設計法の改良

3.1 緒言

第 2 章で述べた入力位相マスクの設計法では，入力位相マスクに一樣な強度の平面波が入射することを想定し，その際の空間周波数分布を評価していた．しかし，この設計法には考慮しなければならない二つの課題があり，これらは実用的な入力位相マスクを設計する上で解決されるべきものである．一つ目の課題は，入力位相マスクによって空間位相変調された信号光の空間周波数分布を任意の帯域に制御できない点である．入力位相マスクに入射する光波は，通常ページデータにより振幅変調された光波であるため振幅分布をもつ．このため，上述の条件で設計された入力位相マスクにより空間位相変調された実際の信号光の空間周波数分布は，入力位相マスク設計時の空間周波数分布にはならず，参照光との空間周波数分布の帯域および強度の不一致が生じる．これは，光利用効率と二光波の干渉効率の観点から好ましくない状態である．二つ目の課題は，信号光への空間位相変調に起因する再生像品質の低下である．入力位相マスクは再生像として取得されるページデータに空間位相変調を付加するものであるため，空間周波数領域で高周波成分に相当する位相分布をもつ箇所では再生像強度の低下が生じ，結果的に再生像の SNR を低下させる原因となる．ここでは，これらの課題を解消するための入力位相マスク設計法の改良について述べる [94]．この設計法では，ページデータが ON, OFF を表現するセルが並んだ構造であることを利用して入力位相マスクを設計することにより，信号光の空間周波数分布を参照光と同様に任意に設定可能にする設計法を提案する．また，再生像強度の低下を軽減し再生像の SNR が向上するように，新たに位相値探索時における拘束条件を導入する．

本章ではまず，上で述べたこれまでの入力位相マスク設計法の問題点について，信号光の空間周波数分布と再生像品質の観点から詳述し，これらを改善するための新たな設計法について述べる．さらに，設計された入力位相マスクを用いた記録・再生シミュレーションをおこない，適切な設計条件を決定する．

3.2 入力位相マスク設計法の課題

3.2.1 信号光の空間周波数分布の曖昧性

入力位相マスクは，ページデータにより振幅変調されて生成された信号光に対し，空間位相変調を付加するものである．このため，信号光の空間周波数分布は (2.6) 式で

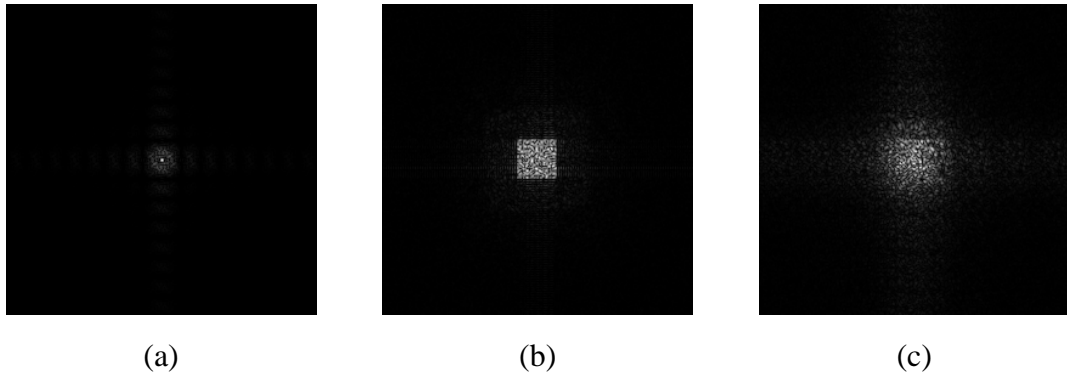


Fig. 3.1 (a) ページデータ, (b) 設計された入力位相マスク, および (c) 入力位相マスクにより空間位相変調された信号光の空間周波数分布

示したように、ページデータおよび入力位相マスクの複素振幅分布の空間周波数分布どうしの畳み込み積分であらわされる分布となる。Fig. 3.1 にページデータ, 入力位相マスク, 信号光の空間周波数分布をそれぞれ示す。ここで、Fig. 3.1 (b) は Nyquist サイズの 2 倍である $2W$ として設計された入力位相マスクのものである。ページデータと入力位相マスクの空間周波数分布どうしの畳み込みにより、信号光の空間周波数は Nyquist サイズ以上に拡がり、強度のばらつきも大きくなっていることがわかる。参照光の空間周波数は任意の帯域内に強度がほぼ一様に分布するように設計されるため、二光波の空間周波数分布の帯域、強度双方で不一致が生じ、結果的に光利用効率および干渉効率の低下につながる。これを改善するために、入力位相マスクの設計ではページデータの振幅分布を考慮した信号光の空間周波数分布を評価対象とする必要がある。

3.2.2 信号光への空間位相変調による再生像品質の低下

撮像素子で取得される再生像は信号光の強度分布そのものであるため、信号光への空間位相変調は再生像の品質に影響を与える。特に、位相が急激に変化する箇所では再生像強度の低下が顕著であり、このような箇所が再生像の SNR 低下の原因であるといえる。これは、入力位相マスクのもつ空間周波数成分に起因している。入力位相マスク上の位相が急激に変化する箇所は空間周波数領域では高周波成分に相当する。しかし、記録時には Nyquist 開口によって帯域制限がおこなわれるため、高周波成分は除去されてしまい、結果として再生像強度の低下につながっている。これを検証するために、二つの領域で一方の位相が 0 、もう一方が ϕ 、すなわちこれらの境界において位相差 ϕ を与える位相マスクを用いて、平面波を想定した振幅一様の領域に空間位相変調をおこない、それをローパスフィルタリングした後の強度分布を数値計算によ

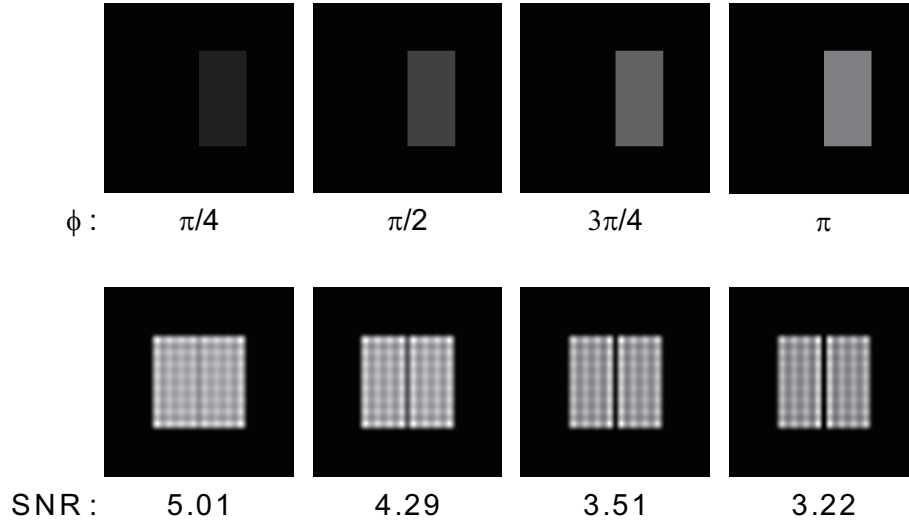


Fig. 3.2 異なる位相変調量を与えるマスクとこれにより変調された光波のローパスフィルタリング後の強度分布

り取得した．位相差 ϕ は， $\pi/4$ ， $\pi/2$ ， $3\pi/4$ ， π の 4 種類を用いた．また，取得した強度分布の品質を再生像と同様に SNR で評価した．Fig. 3.2 に得られた強度分布とその SNR を示す．位相値の境界に強度の低下が生じ，付加する位相差が大きくなるにつれて強度低下の度合いが大きくなり，最も高周波となる 0 ， π のときに最も強度の低下がみられることがわかる．このことから，再生像強度の低下度合いは付加する入力位相マスク上の隣接画素間の位相差を制限することによって制御できるといえる．

3.3 入力位相マスク設計法の改良

3.3.1 ページデータ分布を考慮した入力位相マスクの設計

ページデータの ON セルの分布は記録ごとに異なるため，単一セルからの光波の空間周波数分布がそれぞれ設定した状態となるように入力位相マスクを設計する必要がある．すなわち，ページデータ上の各セルに対応する領域の位相値をそれぞれ独立に探索をおこなうセル法を提案する．セル法では基本的にこれまでと同様に SA に基づいて入力位相マスクが設計されるが，位相値の探索は各セルに対応する領域ごとにおこなう．ページデータが 8×8 セルで構成される場合を例として設計手順を Fig. 3.3 に示す．評価関数は単一セルに対応する入力位相マスクの領域ごとに設定し， n 番目の評価関数 E_n を

$$E_n = \sum_{\text{within evaluation area}} \{|\text{FFT}[p_n(x, y)\exp\{ia(x, y)\}] - C_n(\mu, \nu)\|^2 \quad (3.1)$$

と定める．ここで， $p_n(x, y)$ は n 番目のセルのみが ON であるページデータ， $a(x, y)$ は設計中の入力位相マスク， $C_n(\mu, \nu)$ は n 番目のセルに対する信号光の空間周波数の振幅分布の目標状態を示している．Fig. 3.3 に示すように，あるセルに対応する領域内の位相値の探索が終わると次のセルの設計に移り，順次この一連の手順を繰り返し計算し，すべてのセルの位相値探索が終了したとき 1 回の計算が終わったこととする．画素数 128×128 ，階調数を 32 とし，セル法により設計された入力位相マスクと，これにより空間位相変調された信号光の空間周波数分布を Fig. 3.4 に示す．なお，信号光の空間周波数帯域は Nyquist 開口の 2 倍の大きさである $2W$ とした．セル法では，ページデータと入力位相マスクの複素振幅分布の積であらわされる信号光の空間周波数分布を評価対象とするため，この帯域および強度分布を任意に設定が可能である．このた

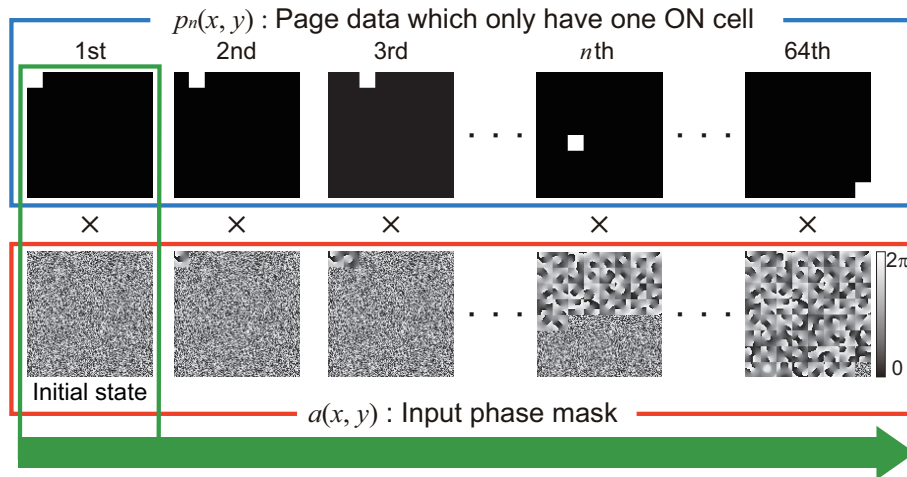


Fig. 3.3 セル法による入力位相マスクの設計手順

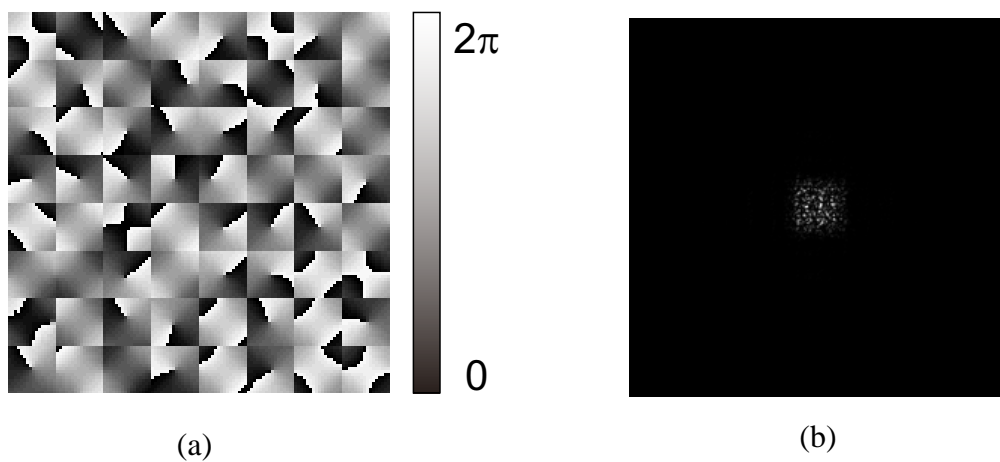


Fig. 3.4 (a) セル法により設計された入力位相マスク; (b) (a) により位相変調された信号光の空間周波数分布

Table 3.1 セル法とこれまでの設計法の比較

	Cell		Previous	
	2W	1.5W	2W	1.5W
Spatial bandwidth				
Light use efficiency	0.72	0.77	0.63	0.58
Coefficient of variation	1.00	1.25	0.96	0.92

め、信号光と参照光の空間周波数帯域を一致させることが可能であり、これまでの入力位相マスク設計法に対して光利用効率を向上させることができる。Table 3.1 に、帯域を 2W および 1.5W とし、セル法により設計された入力位相マスクと、第 2 章で述べた設計法により設計されたものによる信号光の光利用効率と帯域内の空間周波数分布の強度の変動係数を比較した結果を示す。なお、単一ページデータを用いた場合には入力位相マスク上の特定のセルに対応する領域のみが寄与するため、すべてのセルをあつかうように 10 種類のページデータを用いた場合の平均値を示している。帯域内の空間周波数分布のばらつきはこれまでの設計法に比べほぼ同等であるが、光利用効率が大きく向上していることがわかる。これにより、セル法により参照光との干渉効率を低下させず、光利用効率を向上させることが可能であることを示した。

3.3.2 隣接画素間位相差の制限

3.2.2 項で述べたように、信号光への入力位相マスクによる空間位相変調は再生像の品質に影響をおよぼす。これはセル法により設計された入力位相マスクにおいても同様であり、再生像の高品質化のためには入力位相マスクの隣接画素間の位相差が小さくなるように位相値を決定する必要がある。すなわち、Fig. 3.5 に示すように、セル法におけるある画素 $\alpha(k, l)$ の位相値探索の際に選択可能な位相値の範囲を、許容位相差 Φ を用いて

$$\Phi > |\alpha(k, l) - \alpha(k + m, l + n)| \quad (m, n = 0, \pm 1) \quad (3.2)$$

となるように制限することにより、再生像の品質低下を低減した入力位相マスクを設計できる。入力位相マスクの初期状態は、セル法も含めたこれまでの手法ではランダムに分布した位相値を用いていたのに対し、ある基準位相値（ここでは π とする）から許容位相差 Φ を越えない範囲でランダムに分布した位相を用いる。設計時には、ある画素の位相値を任意に変化させたとき、まずその位相値が (3.2) 式を満足するかどうかを判断する。満足していればこれまで通り評価関数の計算をおこなうが、満足していなければもう一度その画素の位相値を変化させる。本手法を用いて、 $\Phi = \pi/2, \pi, 3\pi/2$ として設計された入力位相マスクを Fig. 3.6 にそれぞれ示す。設計条件は、画素

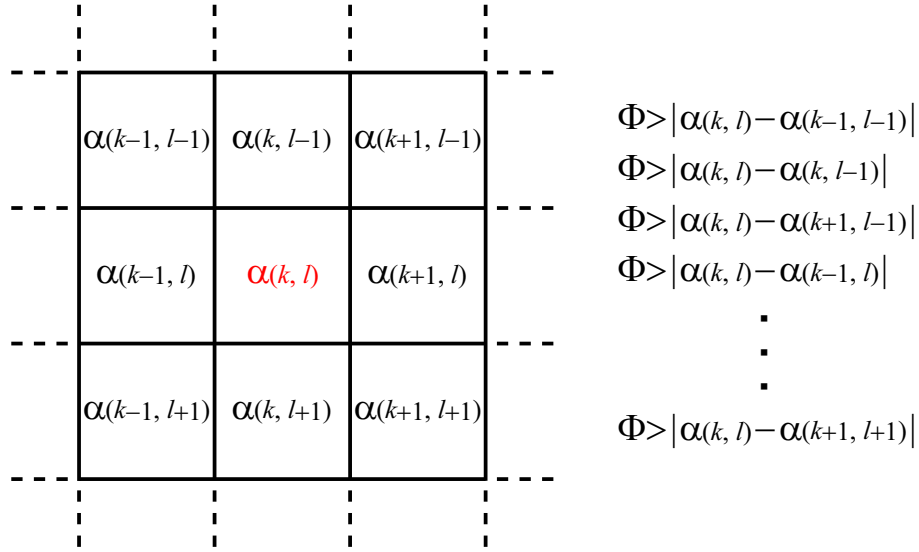


Fig. 3.5 位相値の拘束条件

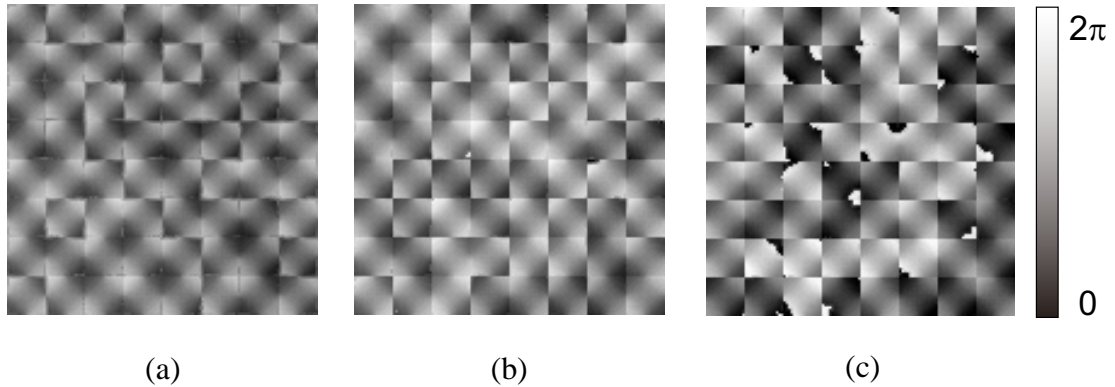


Fig. 3.6 $\Phi =$ (a) $\pi/2$, (b) π , (c) $3\pi/2$ として設計された入力位相マスク

数 128×128 , 階調数を 32 とした. 許容位相差 Φ は小さい値を設定するほうが隣接画素間の位相差が小さくなり, 再生像の品質低下をより軽減できると考えられる. しかし, 入力位相マスクの画素間の位相差を制限することは信号光の空間周波数分布にも影響を及ぼす. Fig. 3.6 により空間位相変調された信号光の空間周波数分布を Fig. 3.7 にそれぞれ示す. 許容位相差 Φ を小さく設定するほど信号光の空間周波数の直流成分が強くあらわれていることがわかる. これは, 隣接画素間位相差を制限したために直流成分を低減するのに位相差が十分でないと考えられ, 記録メディアの浪費や参照光との干渉効率の観点から望ましくない状態である. つまり, 入力位相マスクを用いた信号光への空間位相変調による再生像品質と信号光の空間周波数の直流成分低減作用にはトレードオフの関係があり, 双方をある程度満足する適切な許容位相差 Φ を設定する必要があるといえる. 入力位相マスクの適切な設計条件は, 次節で記録・再生シ

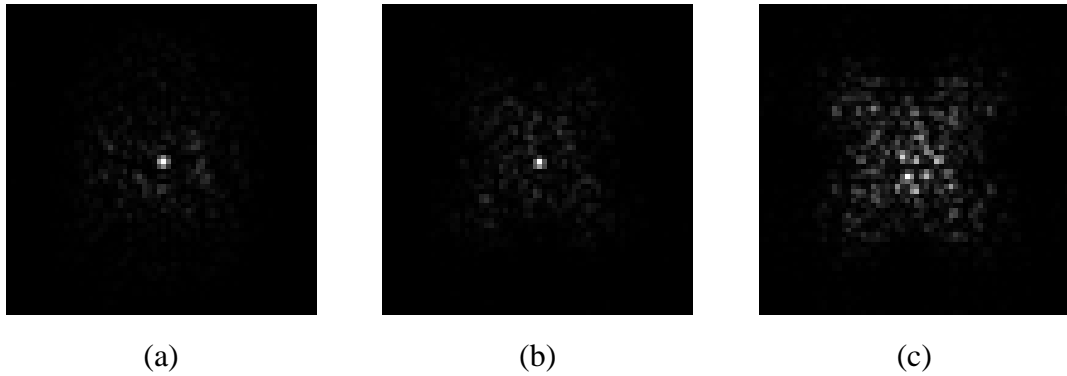


Fig. 3.7 $\Phi =$ (a) $\pi/2$, (b) π , (c) $3\pi/2$ として設計された入力位相マスクにより位相変調された信号光の空間周波数分布

ミュレーション結果をもとにして決定する。

3.4 記録・再生シミュレーションによる設計条件の決定

許容位相差 Φ の設定において設計された入力位相マスクを用いて記録・再生シミュレーションをおこない、得られた再生像の SNR と信号光の空間周波数分布から定量的に適切な設計条件を決定する。なお、参照光および信号光は設計された参照位相マスク、入力位相マスクにより空間位相変調されるものとし、それぞれの光波の空間周波数帯域は $2W$ としたものをを用いて帯域外の高周波成分は開口により除去する。その他のシミュレーション条件を Table 3.2 に示す。 $\Phi = \pi/2, \pi, 3\pi/2$ として設計された入力位相マスクを用いたシミュレーションの結果、得られた再生像をそれぞれ Fig. 3.8 に示す。Fig. 3.8 (a), (b), (c) の SNR はそれぞれ 1.61, 1.55, 1.47 であった。このことから、許容位相差 Φ を小さくするほど再生像の品質が改善されていることがわかる。

Table 3.2 設計条件決定のためのシミュレーション条件

Number of calculation pixels	512×512
Mesh size of SLM	20 μm
Wavelength of light source	532 nm
Focal length of objective lens	50 mm
Thickness of medium	400 μm
Resolution in depth direction	4 μm
Refractive index of medium	1.50
Maximum refractive index modulation	10^{-4}

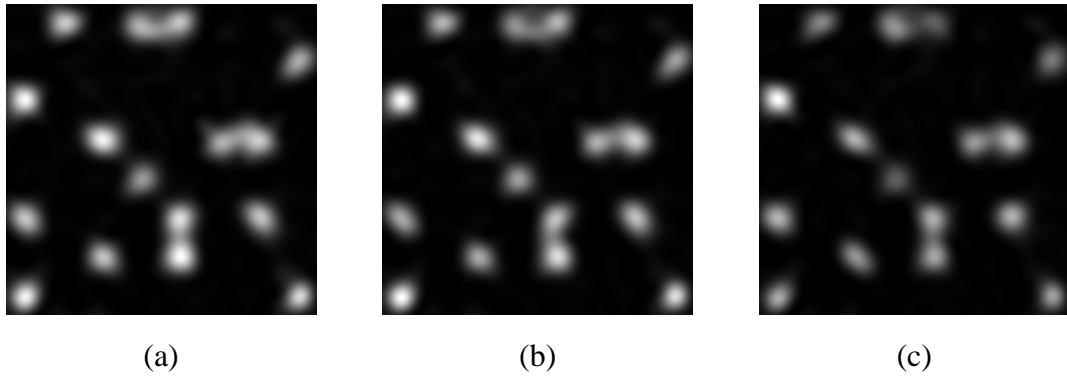
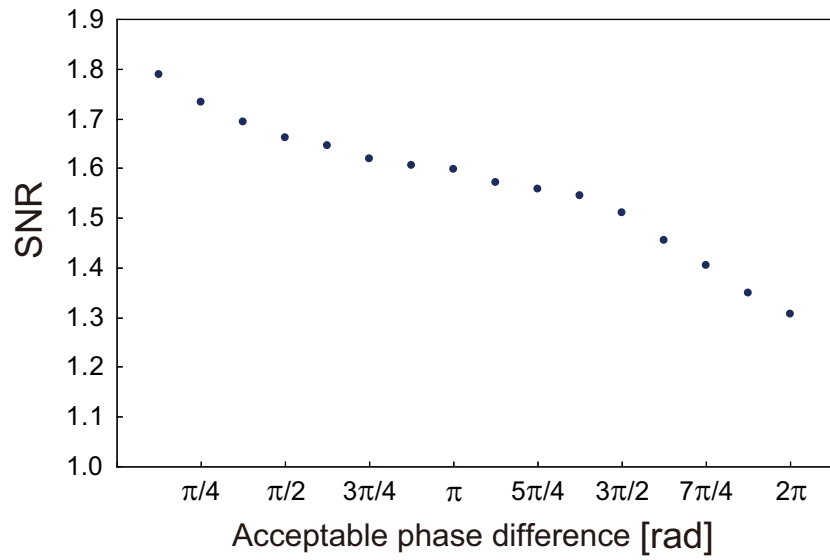


Fig. 3.8 $\Phi =$ (a) $\pi/2$, (b) π , (c) $3\pi/2$ として設計された入力位相マスクを用いて得られた再生像

これは，3.2.2 項で述べたように許容位相差 Φ を大きく設定して設計された入力位相マスクでは，高周波成分である隣接画素間の位相差の大きい箇所が発生し，この部分の強度が失われたためである．これら再生像の SNR と信号光の空間周波数分布から適切な設計条件を求める．許容位相差 Φ に対する再生像の SNR と，信号光の空間周波数帯域内の交流成分の強度平均値の変化をそれぞれ Fig. 3.9 と Fig. 3.10 に示す．ここで，Fig. 3.10 は直流成分の強度を 1 として規格化した値を示している．これらは，許容位相差 Φ を決定するための指標であり，許容位相差 Φ を大きくすればするほど再生像の SNR が低下し，信号光の交流成分の強度が大きくなる，すなわち直流成分が低減されるという関係があることがわかる．しかし，それぞれの変化は若干異なり，SNR が許容位相差 Φ の増加に対してほとんど線形に低下しているのに対し，交流成分の強度は $\Phi = \pi$ までは大きな変化はなく，これを越えると急激に大きくなっていることがわかる．このことから，許容位相差 Φ は π より大きな値とし，再生像品質が過度に低下しない範囲で可能な限り大きな値を設定することが適切な設計条件であるといえる．例えば，許容可能な再生像の SNR が 1.5 とするならば， $\Phi = 3\pi/2$ が適切である．



3.5 結言

本章では、まず第2章で述べた入力位相マスク設計法の問題点について、信号光の空間周波数分布と再生像品質の観点から述べ、これらの問題を改善するために入力位相マスク設計アルゴリズムにセル法と隣接画素間位相差の拘束条件を導入した。第2章で述べた設計法では信号光の空間周波数分布を任意に設定できず、参照光と同一の空間周波数帯域内を記録領域としたとき光利用効率が低かった。セル法は、ページデータの各セルからの光波の空間周波数分布がそれぞれ独立に設定した状態となるように制御するものであり、入力位相マスク上の単一セルに対応する領域ごとに位相値を探索することにより実現される。信号光の空間周波数帯域幅を $2W$ および $1.5W$ となるように設計された入力位相マスクを用いて、数値計算により従来の設計法より光利用効率が向上することを実証した。また、入力位相マスクにより信号光が空間位相変調された結果、再生像品質の低下が生じるという問題もあった。これは、入力位相マスク上の位相差が大きい箇所が発生しており、隣接画素間の許容位相差を設計パラメータとして導入することにより低減可能である。しかし、許容位相差を小さくすればするほど信号光の空間周波数の直流成分の強度が高くなり、参照光との干渉効率、記録メディアの浪費の観点からは望ましくない。このため、適切な設計条件を決定する指標となる許容位相差設定値に対する再生像品質と直流成分低減効果の関係を、記録・再生シミュレーションによる再生像および数値計算により算出した信号光の空間周波数分布から示した。これにより、信号光への空間位相変調による再生像品質低下を軽減し、同時に光利用効率が向上可能な入力位相マスクを設計する条件を決定するための指標となる関係が明らかになった。

第 4 章 空間位相変調技術を用いた広ダイナミックレンジ波面センサー

4.1 緒言

これまでに述べたホログラフィックメモリの他にも機能性位相変調パターンはさまざまなことに応用することが可能である．本章では空間位相変調技術を Shack-Hartmann 波面センサー (SHWFS) に応用し，その性能向上を図ったことについて述べる．SHWFS はマイクロレンズアレイにより撮像素子上に集光されたスポットの変位から入射光波の波面を計測するが，各集光スポットが互いに識別できないという性質上，変位の算出可能な領域は各マイクロレンズの口径サイズに対応した検出域内に制限される．この検出域の大きさが SHWFS による位相勾配計測におけるダイナミックレンジを決定する要因の一つである．本研究では，機能性位相変調パターンである位相ホログラムを SHWFS に適用することにより，検出域ごとに集光スポットではなく識別可能なパターン像を取得するホログラフィック Shack-Hartmann 波面センサー (H-SHWFS) を提案する [95]．本手法により，ダイナミックレンジの検出域サイズによる制限を取り除き，広ダイナミックレンジを有する SHWFS を実現可能である．

まず H-SHWFS によるダイナミックレンジ拡大の基本的な原理について詳述した後に，取得した画像に対して解析をおこなう際に用いる相関ピーク変位検出法について述べる．次に，提案手法を実現するための要素技術であるマイクロホログラムアレイの具体的な設計方法について述べる．最後に，波面計測光学実験およびシミュレーションにより提案手法と従来手法を比較し，その有用性を実証した結果について述べる．

4.2 ホログラフィック Shack-Hartmann 波面センサーのダイナミックレンジ拡大原理

4.2.1 マイクロホログラムアレイによる可識別パターン像取得

SHWFS は物理的なマイクロレンズアレイを用いる手法の他にも，P-SLM にマイクロレンズアレイの位相分布を表示して用いる手法も提案されている [96]．各マイクロレンズによる位相変調作用に相当する位相分布 $\Phi_L(x, y)$ は焦点面への収束球面波の位

相分布であり,

$$\Phi_L(x, y) = -\frac{k}{2f}(x^2 + y^2) \quad (4.1)$$

とあらわされる．ここで， k は波数， f は焦点距離である．P-SLM を用いてマイクロレンズアレイを実現するため，(4.1) 式の各パラメータを変えることによりマイクロレンズの焦点距離や口径を容易に変更可能である．またマイクロレンズを実現する位相に加えて，小開口ごとに任意の位相変調を付加することもできるという利点がある．

本手法では，マイクロレンズアレイではなく微小な位相ホログラムをアレイ状に配置したマイクロホログラムアレイを P-SLM に表示することにより，その焦点面において集光スポットではなく任意のパターン像を得ることが可能である．マイクロホログラムアレイは Fig. 4.1 に示すように検出域ごとに異なるパターン像が得られるように設計されている．これは 3×3 の検出域ですべて互いに異なるパターン像が再生されるように設計されたマイクロホログラムアレイを用いた場合である．これらのパターン像は従来の SHWFS における集光スポットと同様に入射光波の位相勾配に応じて変動するため，これらの変位から従来と同様に波面を算出することができる．また，検出域ごとに識別可能なパターン像を得るため，検出域を隣接領域まで拡大することが可能である．さらに， 5×5 ， 7×7 と異なるパターン像が得られる検出域数を増やすことにより，さらに検出域を外部の領域まで拡大することが可能である．しかし後述するが，用いるパターン数と解析時間はトレードオフの関係にあるため，本研究では 3×3 の 9 通りのパターン像を用いる場合を採用している．

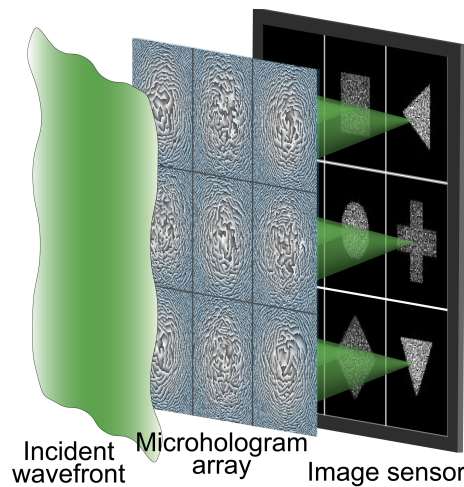


Fig. 4.1 ホログラフィック Shack-Hartmann 波面センサーの概念図

4.2.2 相関ピーク変位検出法

H-SHWFS では，入射波面の位相勾配によって変動したパターン像の変位を算出する必要があるが，従来のマイクロレンズアレイによる集光スポットに対し，これらは複雑な形状をしているためその変位算出は容易ではない．これを解決するため，変位算出時には相関ピーク変位検出法を適用する．これはパターン認識など複雑な形状のパターンの位置や変位を検出する際に効果的である相互相関演算によるテンプレートマッチング手法 [97] を応用したものである．Fig. 4.2 に相関ピーク変位検出法の原理図を示す．撮像素子で得られた多数のパターン像を含む再生画像を解析する際には，単一のパターン像のみを含むテンプレート画像群を用意しそれらとの相互相関演算をおこなう．Fig. 4.2 の場合，9 通りのテンプレート画像を用意し，9 回の相互相関演算をおこなうことになる．この相互相関演算は高速 Fourier 変換を用いて簡単に計算することができるので，

$$R(x, y) \star T_n(x, y) = \text{IFFT}[\text{FFT}[R(x, y)]\text{FFT}[T_n(x, y)]^*], \quad (4.2)$$

とあらわされる [98]．ここで， $R(x, y)$ ， $T_n(x, y)$ ， $*$ はそれぞれ再生画像， n 番目 ($1 \leq n \leq 9$) のテンプレート画像，複素共役を示している．また， \star ， $\text{FFT}[\]$ ， $\text{IFFT}[\]$ はそれぞれ

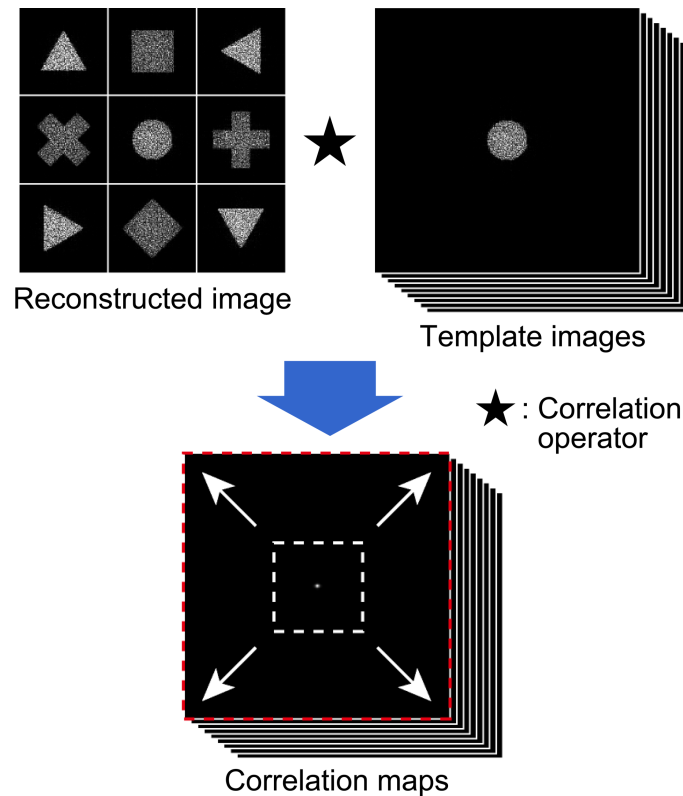


Fig. 4.2 相関ピーク変位検出法の原理

れ相互相関演算子，高速 Fourier 変換演算子，逆高速 Fourier 変換演算子である．これらの計算の結果，相関信号マップ群が得られる．相関信号マップ上には，再生画像上のパターン像とテンプレート画像上のパターン像が一致する場所に最も強い相関信号が発生し，それ以外の場所には相関信号はほとんどあらわれない．パターン像の変位は相関信号マップ上の相関ピークの変位を求めることにより取得され，このときには 3×3 の検出域内で高強度の相関ピークは一つのみであるため，検出域を隣接領域まで拡大することができる．また，相関ピークは相関信号の重心位置とし，従来の SHWFS で用いていた重心検出アルゴリズム [99] をそのまま適用可能である．Fig. 4.2 の場合，位相勾配に対するダイナミックレンジは x 方向， y 方向それぞれに 3 倍拡大することができる．相関ピーク変位検出法では，原理上複数回の相互相関演算が必要であり，これが解析時間のボトルネックである．しかし，相互相関演算自体は高速 Fourier 変換を用いた単純な計算であるため，GPU を用いて計算することにより解析時間の大幅な短縮が可能である [100]．

4.2.3 マイクロホログラムアレイの設計

H-SHWFS で用いるマイクロホログラムアレイは P-SLM により実現するため，位相型のホログラムである必要がある．また，マイクロホログラムアレイを構成する各マイクロホログラムはレンズの焦点面上でパターン像を得るため，Fourier 変換型のキノフォームに基づいて設計する．これは，任意のパターンをもとにコンピュータ上で Fourier 変換を計算することにより設計され，得られたホログラムにより位相変調された光波はレンズで Fourier 変換されると，その焦点面上で設計時に与えた強度分布に対応したパターン像が再生像として得られる．Fig. 4.2 に示す再生画像の場合，実際には Fig. 4.3 に示すように相関ピークの周囲に不要な相関信号が発生する．これらの信号は計測誤差の要因となるため，可能な限りその強度を抑える必要がある．すなわち，

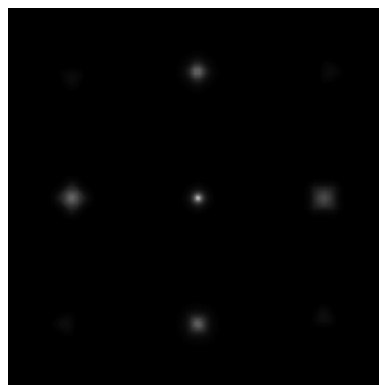


Fig. 4.3 相関ピーク周囲の不要な相関信号

4.2 ホログラフィック Shack-Hartmann 波面センサーのダイナミックレンジ拡大原理

それぞれのパターン像は互いに相関の低いものを採用する必要がある．また，集光スポットを取得する従来の SHWFS に比べ，提案手法は分布をもつパターン像を取得するため入射光波の強度が低い環境において計測精度の低下が懸念される．このため，パターン像は可能な限り少ない画素数で表現可能なものを採用する．さらに，撮像素子の暗電流ノイズや迷光に対して耐性をもたせるため，2 値で表現できるパターン像とする．これらの高強度の画素どうしは画素間干渉によるパターン像の画質低下を防ぐために隣接しないものとする．これらの条件から Fig. 4.4 に示す 9 通りのパターンを採用した．各マイクロホログラムはこれらのパターンをもとに設計し，これらを 3×3 の領域に配列する．さらに各マイクロホログラムにレンズレス Fourier 変換効果を与えるため，(4.1) 式で示されるレンズの位相分布を付加し，これを単位マイクロホログラムアレイとする．このような設計手順で設計された単位マイクロホログラムアレイ

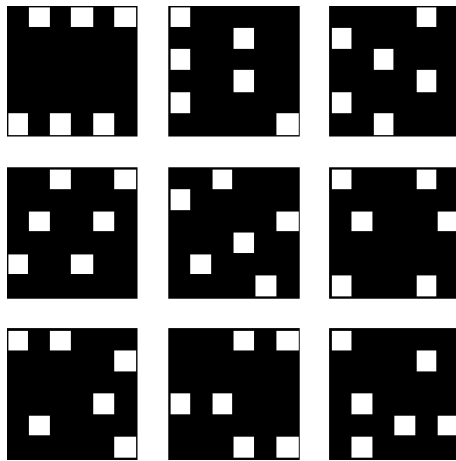


Fig. 4.4 マイクロホログラムアレイの設計に用いたパターン

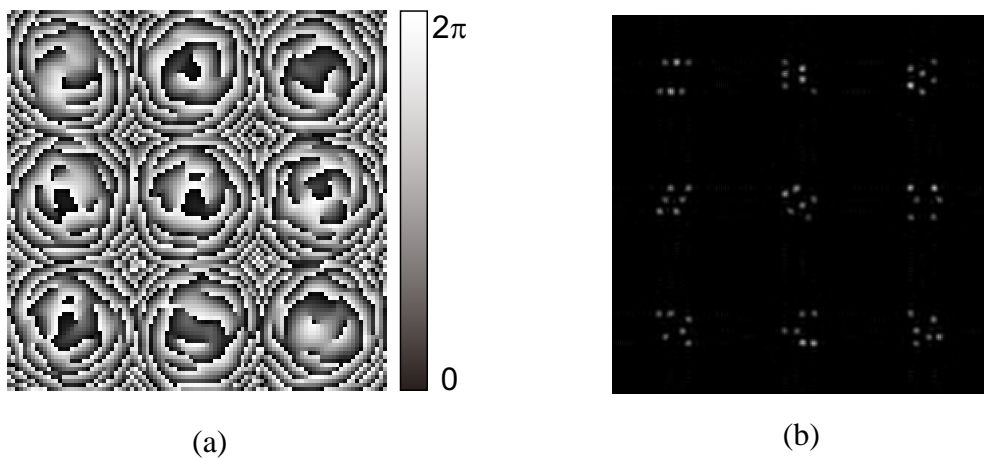


Fig. 4.5 (a) 単位マイクロホログラムアレイ; (b) 再生画像

を Fig. 4.5 (a) に、これにより再生面上で得られる数値再生画像を Fig. 4.5 (b) にそれぞれ示す。Fig. 4.4 に示すパターンに対応したパターン像が設計通り得られていることがわかる。実際には、Fig. 4.5 (a) に示す単位マイクロホログラムアレイを多数配列したものを用いるため、同一の 3×3 のパターン像が周期的にあらわれることになる。

4.3 Zernike の多項式による波面近似

一般的に SHWFS では、マイクロレンズアレイの小開口ごとにサンプリングされた局所的な波面の平均位相勾配の分布が取得されるため、原理的に検出域内で一定の位相勾配しか得ることができない。そのため、計測される位相分布の空間分解能は低い。これを Zernike の多項式を用いた波面近似をおこなうことにより解消する。Zernike の多項式は各波面収差を独立にあらわすことができるものであり、それぞれが直交関数の関係にある多項式の重み付き線形結合により波面を表現することができる [60–62]。波面 $W(r, \theta)$ は Zernike の多項式を用いて

$$W(r, \theta) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i Z_i(r, \theta) \quad (4.3)$$

とあらわされる。 (r, θ) は単位円内の極座標系をあらわしており、それぞれ

$$0 \leq r \leq 1, \quad (4.4)$$

$$0 \leq \theta < 2\pi \quad (4.5)$$

を満たす。(4.3) 式中の $Z_i(r, \theta)$ が Zernike の多項式であり、これは

$$Z_i(r, \theta) = \begin{cases} \sqrt{2(n+1)} R_n^m(r) G^m(\theta) & (m \neq n) \\ \sqrt{n+1} R_n^0(r) & (m = 0) \end{cases} \quad (4.6)$$

とあらわされる。ここで、 $R_n^m(r)$ と $G^m(\theta)$ はそれぞれ

$$R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{\frac{n-m}{2}} (-1)^s \frac{(n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)! \left(\frac{n-m}{2} - s\right)!} r^{n-2s}, \quad (4.7)$$

$$G^m(\theta) = \begin{cases} \sin(m\theta) & i \text{ odd} \\ \cos(m\theta) & i \text{ even} \end{cases} \quad (4.8)$$

である。第 11 項までの各波面収差に対応する Zernike の多項式は Table 4.1 に示す通りであり、より高次の波面収差を表現するためには第 12 項、第 13 項、 \dots と増やしていく必要がある。 a_i は波面収差の大きさをあらわす Zernike の係数であり、算出された位相勾配分布を最小二乗法を用いて各波面収差にフィッティングすることにより

Table 4.1 各波面収差に対応する Zernike の多項式

n	m	$Z_i(r, \theta)$	波面収差の種類
0	0	1	ピストン
1	1	$r \cos \theta$ $r \sin \theta$	チルト
2	0	$\sqrt{3}(2r^2 - 1)$	デフォーカス
	2	$\sqrt{6}r^2 \sin(2\theta)$	非点収差
	2	$\sqrt{6}r^2 \cos(2\theta)$	
3	1	$\sqrt{8}(3r^3 - 2r) \sin \theta$	コマ収差
	1	$\sqrt{8}(3r^3 - 2r) \cos \theta$	
	3	$\sqrt{8}r^3 \sin(3\theta)$	トレフォイル収差
	3	$\sqrt{8}r^3 \cos(3\theta)$	
4	0	$\sqrt{5}(6r^4 - 6r^2 + 1)$	球面収差

決定される．最終的に，算出された Zernike の係数を (4.3) 式に代入することにより近似波面を得ることができる．本研究では，一般的に波面収差を表現するのに十分であるとされている第 36 項までの Zernike の多項式を用いて波面近似をおこなう．

4.4 波面計測光学実験

提案手法によるダイナミックレンジ拡大作用を従来手法と比較することにより実験的に検証した．H-SHWFS は Fig. 4.6 に示すような光学系により実現される．計測対象波面は曲率半径が約 350 mm となるように点光源を配置して生成した．H-SHWFS では，マイクロホログラムアレイ中の単一のマイクロホログラムごとに被計測波面を

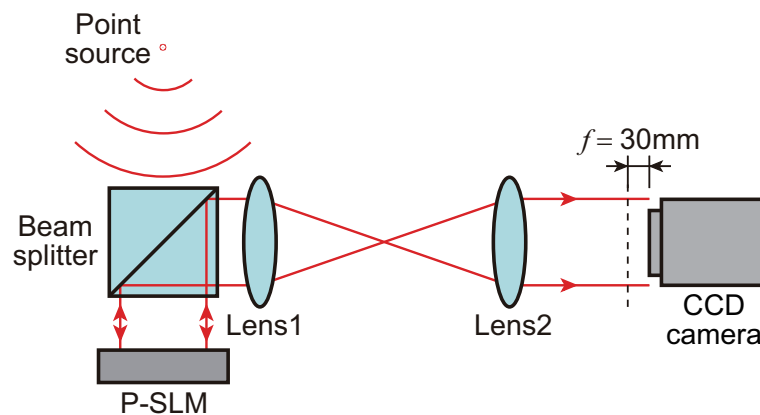


Fig. 4.6 波面計測実験光学系

Table 4.2 波面計測光学実験の条件

Wavelength of light source	632.8 nm
Number of pixels of P-SLM	792×600
Pixel size of P-SLM	20 μm
Number of pixels of image sensor	1280×960
Pixel size of image sensor	4.65 μm
Size of a microhologram	640 μm
Focal length of a microhologram	30 mm

空間的にサンプリングするため、空間分解能を向上させるためには各マイクロホログラムサイズを可能な限り小さくすることが望ましい。しかし、良好な再生像を得るためにはマイクロホログラムは最低 32×32 画素程度で構成される必要がある。このため、本手法における空間分解能は利用可能な P-SLM の画素サイズに依存し、画素サイズが $20 \mu\text{m}$ の P-SLM を用いる場合、マイクロホログラムの一辺の大きさは $640 \mu\text{m}$ となる。その他の実験パラメータを Table 4.2 に示す。なお、P-SLM や撮像素子のサイズに依存して計測可能な空間領域が狭いため、従来手法とのダイナミックレンジの差を示すために光軸から球面波の中心をずらし、より位相勾配の大きな外周部のみを計測した。また、実験では反射型の P-SLM によりマイクロホログラムアレイを実現しているため、P-SLM 面から焦点距離だけ離れた面に撮像素子を配置することは物理的に不可能である。このため、 $4-f$ 光学系により P-SLM と共役な面 (Fig. 4.6 中の破線部) を生成し、この面から焦点距離だけ離れた面上に撮像素子を配置した。

実験により得られた再生画像を Fig. 4.7 に示す。入射光波が平面波、球面波いずれの場合も設計通りのパターン像が得られており、位相勾配に応じて変動していることがわかる。これらの再生画像に相互相関演算をおこない得られた相関信号マップの一例を Fig. 4.8 にそれぞれ示す。参照波面である平面波のときの相関ピーク位置からパターン像の変動した位置まで相関ピークが変動しており、上部の相関ピークは従来の検出域を越えていることがわかる。これらの相関信号マップから算出した位相勾配分布を Fig. 4.9 (a) に、比較のために従来手法で得られた位相勾配分布を Fig. 4.9 (b) にそれぞれ示す。従来手法では、上部の位相勾配には誤りが生じているが、提案手法では正しく求められている。これらの位相勾配分布を Zernike の多項式により近似した波面を Fig. 4.10 に示す。従来手法では誤りが生じているのに対し、提案手法では誤りなく被計測波面である球面波を計測することができている。これらの結果より、提案手法による SHWFS のダイナミックレンジ拡大を実証した。

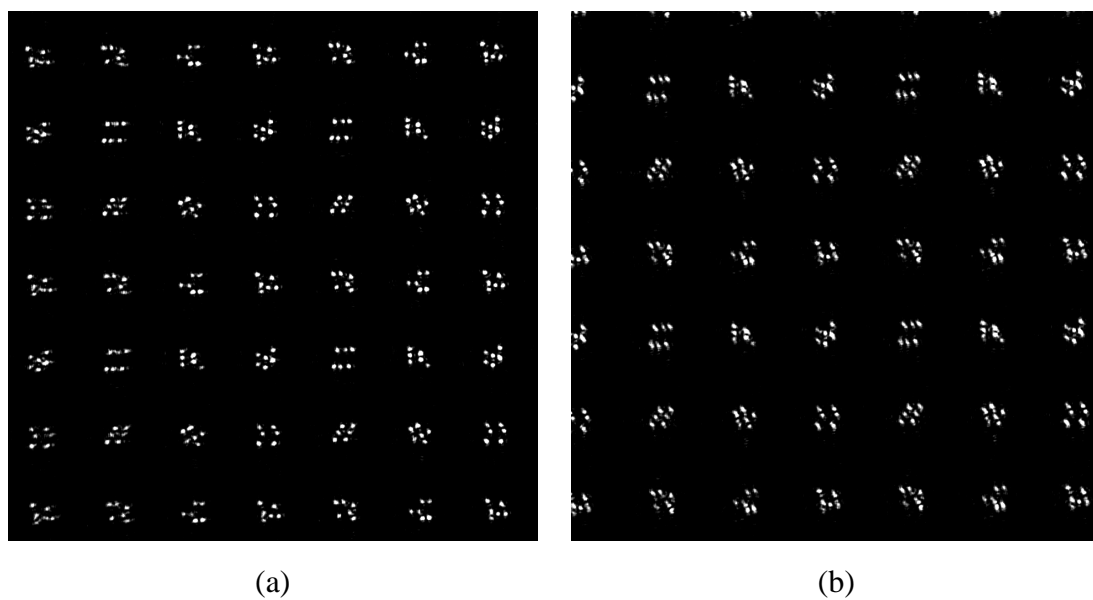


Fig. 4.7 波面計測実験により得られた再生画像; (a) 参照波面; (b) 球面波

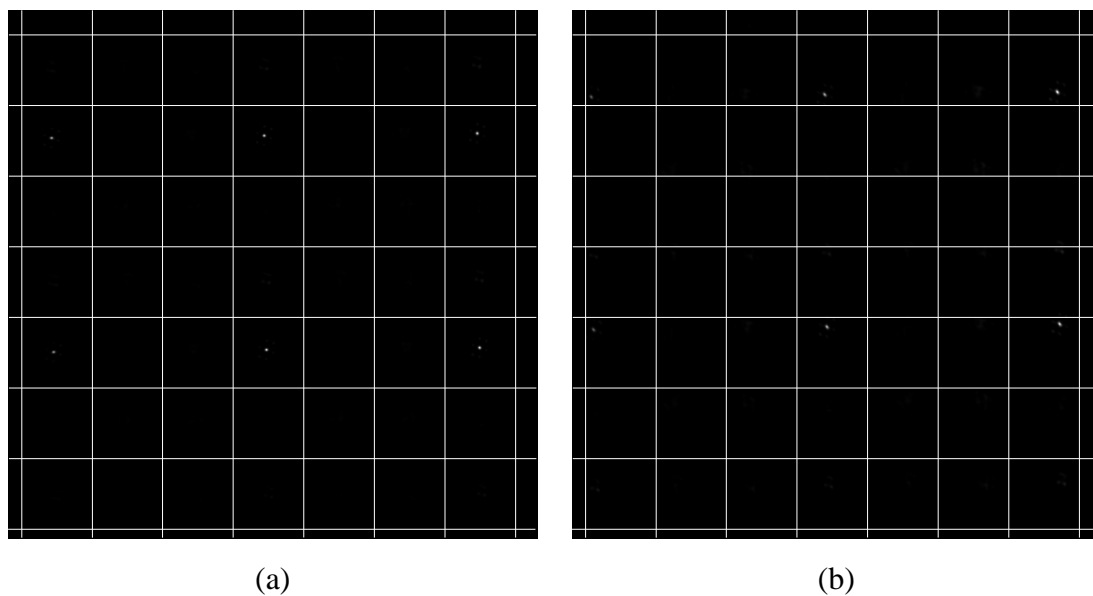


Fig. 4.8 (a) 参照波面, および (b) 球面波による再生画像から得られた相関信号マップの一例

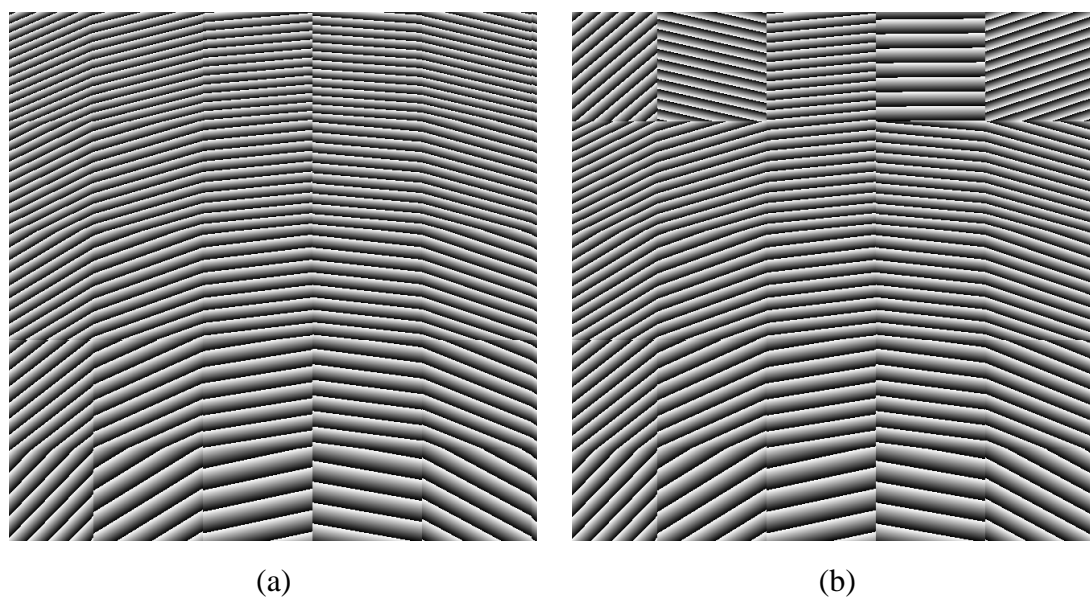


Fig. 4.9 波面計測実験において (a) 提案手法, および (b) 従来手法により得られた位相勾配分布

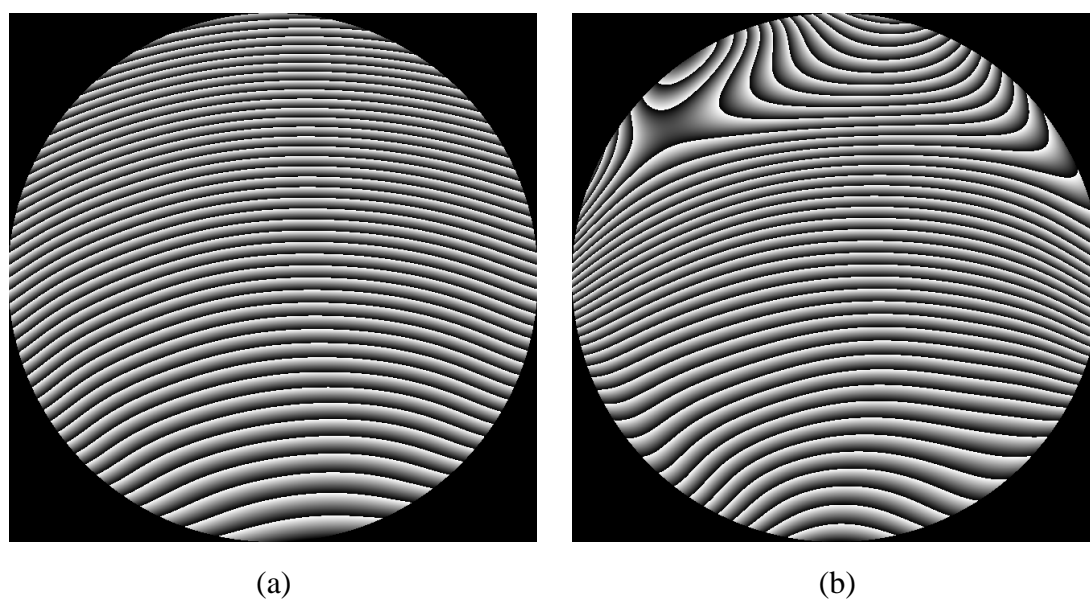


Fig. 4.10 波面計測実験において (a) 提案手法, および (b) 従来手法により算出された近似波面

4.5 波面計測シミュレーションによるダイナミックレンジおよび計測精度の定量評価

H-SHWFS のダイナミックレンジと計測精度を定量的に評価するために、Fig. 4.11 に示すような位相分布であらわされるデフォーカス、非点収差、コマ収差、球面収差をもつ波面を被計測波面として波面計測シミュレーションをおこない、マイクロレ

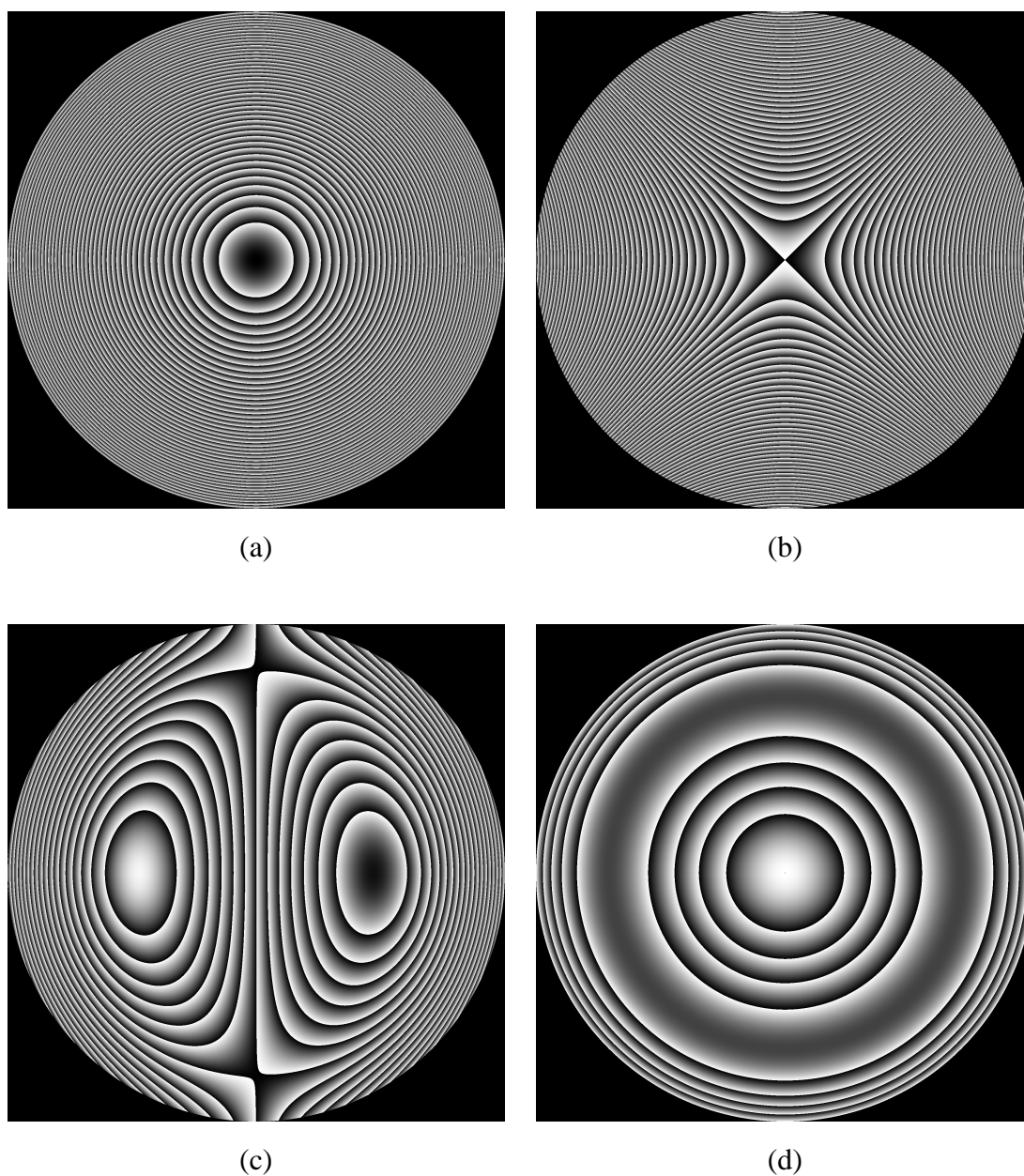


Fig. 4.11 被計測波面の位相分布: (a) デフォーカス; (b) 非点収差; (c) コマ収差; (d) 球面収差

Table 4.3 波面計測シミュレーションの条件

Wavelength of light source	632.8 nm
Number of pixels of P-SLM	1024×1024
Pixel size of P-SLM	20 μm
Number of pixels of image sensor	4096×4096
Pixel size of image sensor	5 μm
Size of a microhologram	640 μm
Focal length of a microhologram	30 mm

ンズアレイを用いる一般的な SHWFS との比較をおこなった．その他のシミュレーションパラメータを Table 4.3 に示す．評価指標として，波面収差の大きさをあらわす Zernike の係数を用い，これを徐々に大きくしていったときに計測された波面を理論値と比較して，その二乗平均平方根誤差（RMSE : Root Mean Square Error）を用いて定量的に評価した．RMSE は

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \{W(m,n) - R(m,n)\}^2} \quad (4.9)$$

であらわされる． $W(m,n)$, $R(m,n)$ はそれぞれ計測の結果得られた波面の位相分布，被計測波面の位相分布の理論値であり， M , N はそれぞれ横方向，縦方向の画素数である．ここでは，RMSE が $\lambda/2$ すなわち， π rad/pixel を越えたときをダイナミックレンジの境界とした．

シミュレーションにより得られたデフォーカス波面，非点収差波面，コマ収差波面，球面収差波面に対するダイナミックレンジの評価結果を Fig. 4.12, Fig. 4.13, Fig. 4.14, Fig. 4.15 にそれぞれ示す．デフォーカスと非点収差に対しては提案手法によりダイナミックレンジが大幅に拡大されていることがわかる．一方，コマ収差に対しては提案手法と従来手法のダイナミックレンジにはほとんど差がなく，球面収差に対しては提案手法のほうがややダイナミックレンジが狭いことがわかる．提案手法と従来手法によるデフォーカス波面と非点収差波面に対する計測において，従来手法がダイナミックレンジを越えた時に算出された波面を Fig. 4.16, Fig. 4.17 にそれぞれ示す．同様にコマ収差波面と球面収差波面に対して提案手法がダイナミックレンジを越えた時に算出された波面を Fig. 4.18, Fig. 4.19 にそれぞれ示す．デフォーカス波面と非点収差波面においては，位相勾配の大きい波面の外周部で従来手法の検出域を集光スポットが越えたため誤りが生じたことがわかる．コマ収差波面と球面収差波面に対しては，従来手法で計測できる領域において提案手法による計測の誤りが生じている．

4.5 波面計測シミュレーションによるダイナミックレンジおよび計測精度の定量評価

これらはいずれも被計測波面の曲率が大きくなり、撮像素子上で得られるパターン像が歪んでしまったため、相互相関演算による適切な相関ピークが得られなかったためであるといえる。これはマイクロホログラムアレイの空間分解能を向上させることや、曲率による歪みに強いパターン像を用いることにより改善できると考えられる。

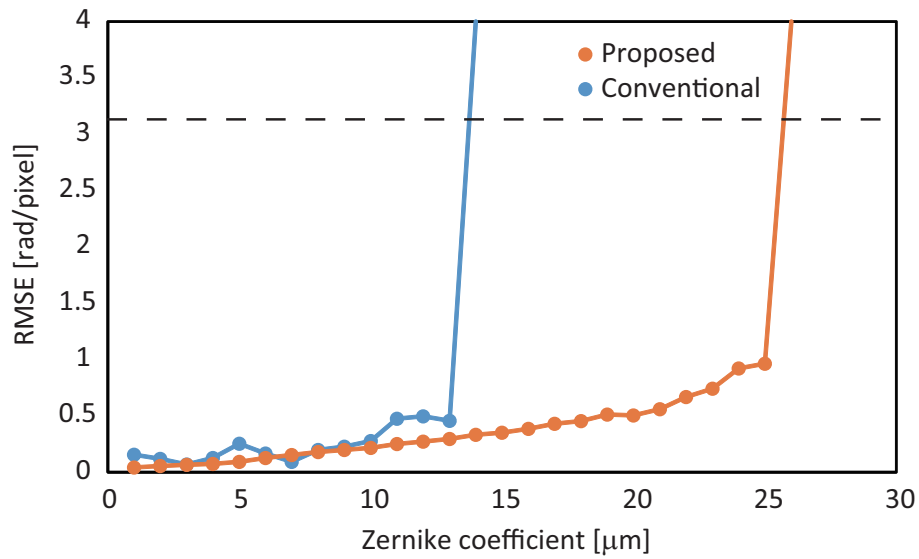


Fig. 4.12 デフォーカス波面に対する Zernike の係数による RMSE の推移の比較

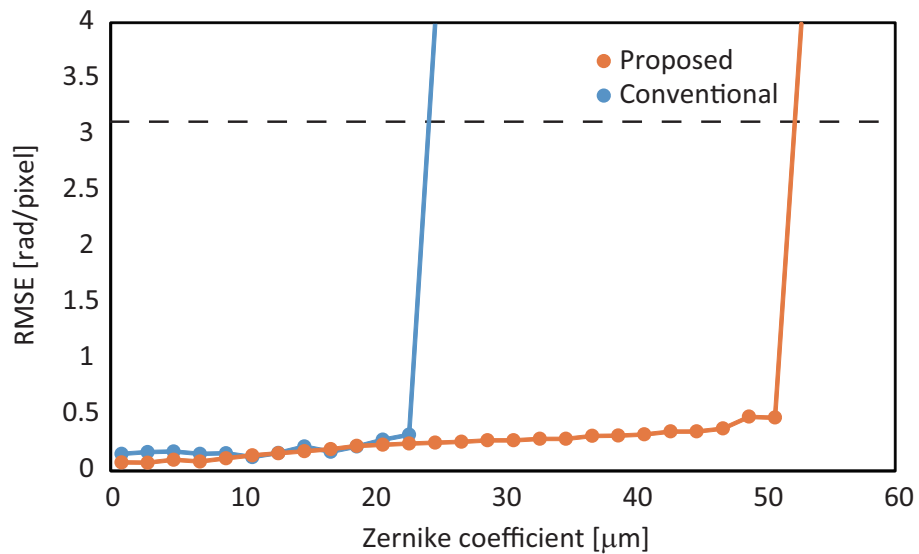


Fig. 4.13 非点収差波面に対する Zernike の係数による RMSE の推移の比較

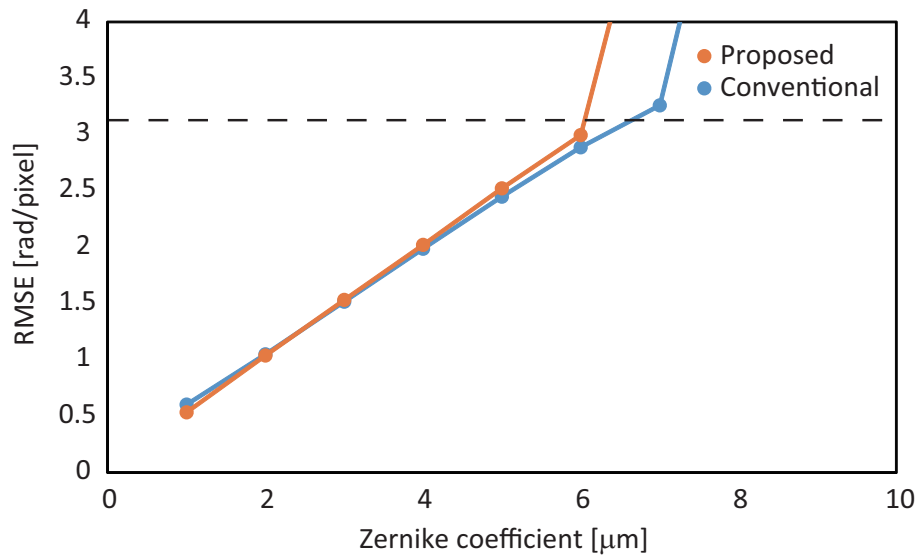


Fig. 4.14 コマ収差波面に対する Zernike の係数による RMSE の推移の比較

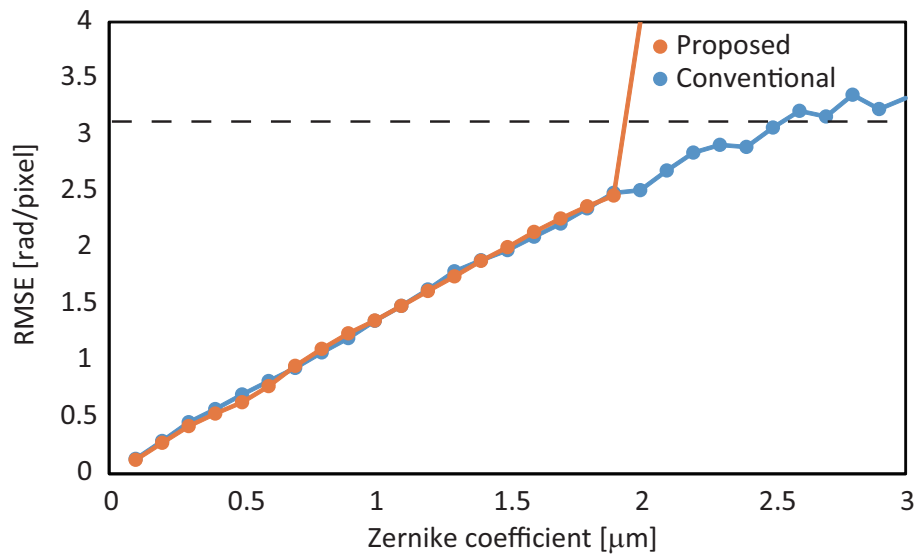


Fig. 4.15 球面収差波面に対する Zernike の係数による RMSE の推移の比較

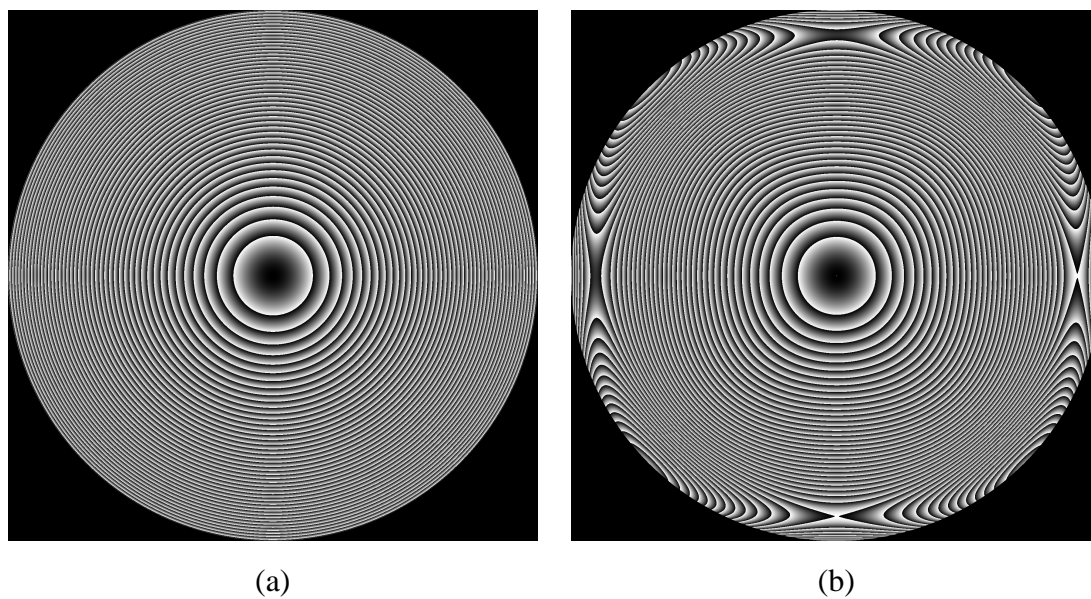


Fig. 4.16 波面計測シミュレーションにおいて (a) 提案手法, および (b) 従来手法により算出されたデフォーカス波面

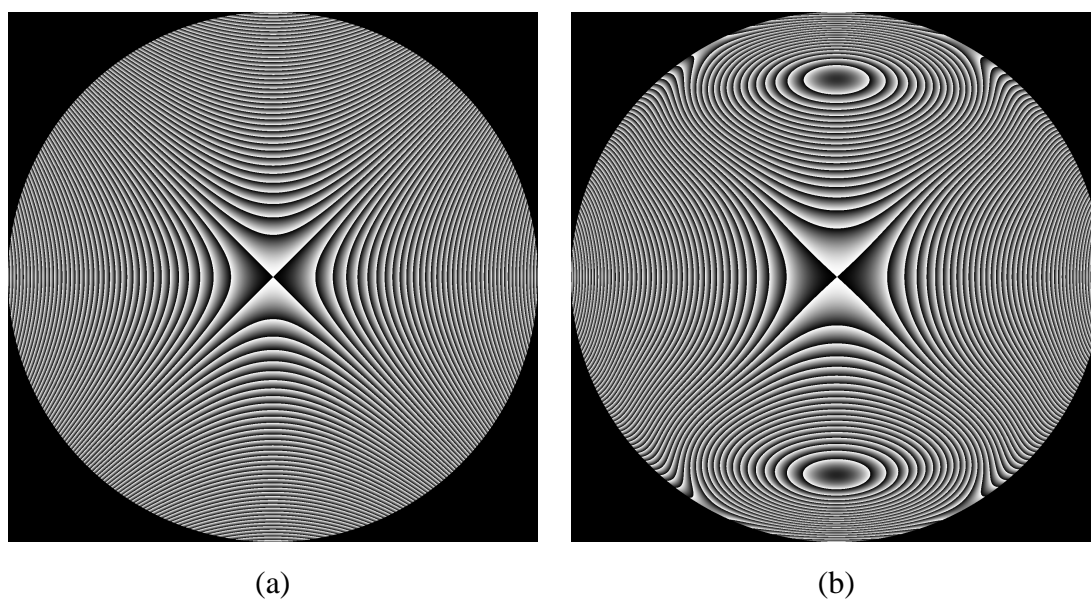


Fig. 4.17 波面計測シミュレーションにおいて (a) 提案手法, および (b) 従来手法により算出された非点収差波面

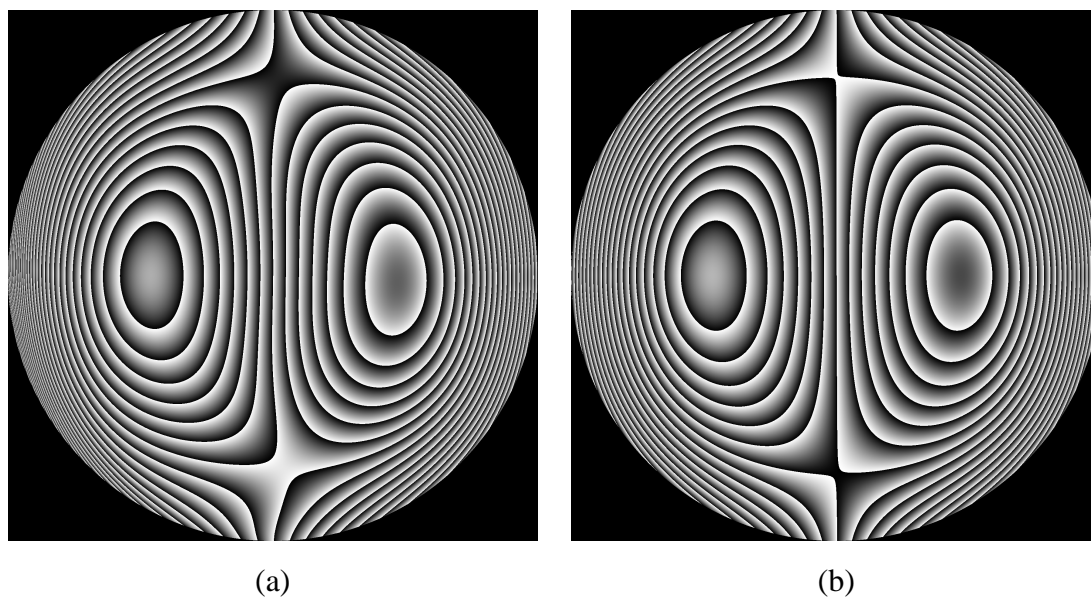


Fig. 4.18 波面計測シミュレーションにおいて (a) 提案手法, および (b) 従来手法により算出されたコマ収差波面

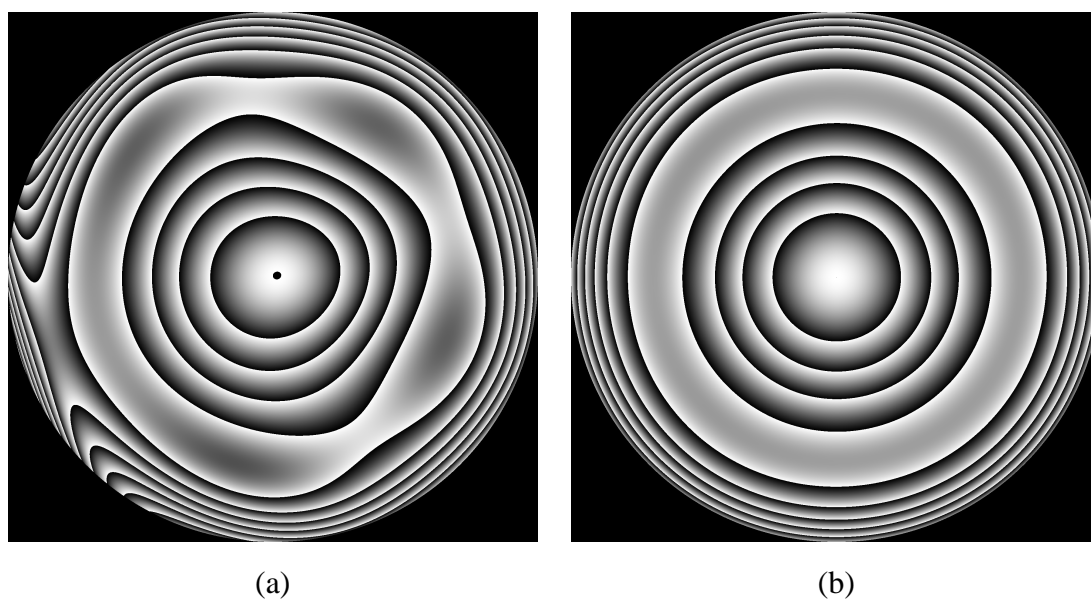


Fig. 4.19 波面計測シミュレーションにおいて (a) 提案手法, および (b) 従来手法により算出された球面収差波面

4.6 ハニカム構造の導入による解析の高速化と空間分解能の向上

提案する H-SHWFS は、ある検出域に隣接する周囲のすべての検出域で異なるパターン像を得ることにより、それらの領域中でパターン像の変動を検出できるという原理に基づくものである。しかしながら、この場合では最低でも 9 回の相互相関演算が必要であり解析時間のボトルネックになっている。これは、GPU を用いた相互相関演算の並列演算処理を導入することにより高速化することは可能であるが、根本的な解決法にはなっておらず、原理的に計算量を削減することが望ましいといえる。そこで、これまでは正方形のマイクロホログラムを 3×3 の領域に配列したマイクロホログラムアレイを用いていたが、これを正六角形のマイクロホログラムを配列することによりハニカム構造とすることを考える。ハニカム構造のマイクロレンズアレイを用いた SHWFS は従来から提案されており、これには各マイクロレンズ間の間隔が一定であるため正方形のマイクロレンズを配列したマイクロレンズアレイに比べて空間分解能が高く、半径方向にダイナミックレンジをほぼ一定にすることができる利点がある [101]。ハニカム構造を導入して作成したマイクロホログラムアレイとその再生画像を Fig. 4.20 に示す。これまでの正方形のマイクロホログラムを配列したマイクロホログラムアレイと同様に、ある検出域とそれに隣接するすべての検出域において異なるパターン像が得られていることがわかる。H-SHWFS ではハニカム構造の導入により単位マイクロホログラムアレイは七つのマイクロホログラムから構成され、解析の際の相互相関演算を従来の 9 回から 7 回に削減することができるため解析時間の短縮につながる [102]。また、空間分解能の向上により被計測波面の曲率によるパターン像の歪みに対する耐性も向上することが期待される。

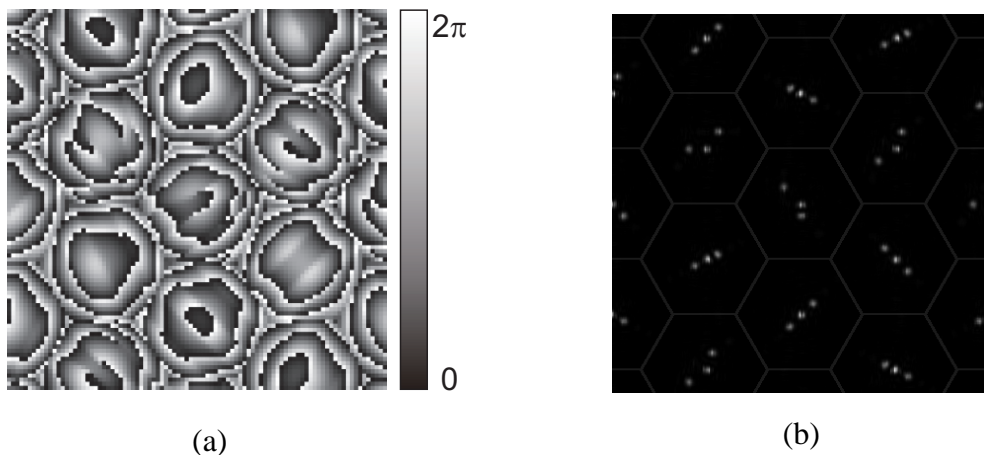


Fig. 4.20 (a) ハニカムマイクロホログラムアレイ; (b) 再生画像

4.7 結言

本章では、機能性位相変調パターンを応用した SHWFS による波面計測のダイナミックレンジ拡大について述べた。Fourier 変換面において任意のパターン像を生成可能な位相ホログラムを SHWFS に応用することにより、その位相勾配に対するダイナミックレンジを拡大する H-SHWFS を提案した。これは、従来の集光スポットの代わりに、マイクロホログラムアレイにより生成した相互に識別可能なパターン像の変位を取得することにより、従来では計測できなかった大きな位相勾配を有する波面の計測を可能にするものである。3×3 の検出域ですべて異なるパターン像が得られる場合について、まず基本的な原理を述べた後に、各パターン像の変位算出の際に重要となる相関ピーク変位検出法について述べた。次に、撮像素子で取得される各パターンの選定について、これらの満たすべき条件を示し、その下で実際に用いるマイクロホログラムアレイの設計をおこなった。さらに、提案手法による波面計測の光学実験および数値シミュレーションをおこない、一般的なマイクロレンズアレイを用いる SHWFS と比較し、提案手法による位相勾配に対するダイナミックレンジ拡大を実証するとともに、両手法のダイナミックレンジを計測精度の観点から定量的に評価した。この結果、コマ収差波面と球面収差波面に対してはダイナミックレンジを拡大できなかったが、デフォーカス波面と非点収差波面に対しては大幅なダイナミックレンジの向上がみられた。コマ収差波面と球面収差波面に対する計測では、被計測波面の曲率によるパターン像の歪みにより相互相関演算で適切な相関ピークが得られなかったことがダイナミックレンジを拡大できなかった要因であると考察した。しかしながら、ハニカム構造を導入したマイクロホログラムアレイによる空間分解能の向上や歪みに強いパターンを用いることにより、これらの収差波面に対しても改善が可能であると考えられる。以上のことから、提案手法によって一般的な収差波面に対する SHWFS のダイナミックレンジ拡大が実証された。

第 5 章 2 値位相ホログラムの設計によるホログラフィックディスプレイの画質向上

5.1 緒言

ホログラフィックディスプレイでは、SLM に表示するホログラムを順次切書き替えていくことにより立体動画を再生することが可能である。しかし、動画の再生時間や用いるホログラムの解像度が大きくなれば、ホログラムのデータ量は膨大なものとなる。また、ホログラムを表示するための SLM のリフレッシュレートにより動画再生時の映像の滑らかさや再生像の積算による画質向上度が制限される。0 か π の 2 値にのみ位相変調する場合、ホログラムのデータ量を低減できるほか、高速な動作が可能な P-SLM である強誘電性液晶素子を用いたものが利用可能である。このため、2 値位相ホログラムを用いることによりホログラフィックディスプレイの上述の問題を解決することができる。しかし、ホログラムの 2 値化により再生像の画質が低下してしまうという問題が生じる。本研究では、2 値位相ホログラムを反復計算アルゴリズムにより設計し、その結果得られたホログラムからの再生像を積算することにより観察される物体像の画質を向上させる [103]。

本章ではまず、ホログラフィックディスプレイのための 2 値位相ホログラムの設計法について述べ、次に作成したホログラムからの再生像を積算することによる物体像画質を数値再生シミュレーションと光学再生実験により評価した結果について述べる。

5.2 Fresnel ピンポンアルゴリズムに基づいた 2 値位相ホログラム設計法

2 値位相ホログラムの再生像画質向上のために、Fresnel ピンポンアルゴリズム [104] に基づいてホログラムの設計をおこなう。このとき、P-SLM の高速動作およびデータ量の低減を考慮してアルゴリズムにホログラムの 2 値化処理を導入する。提案する 2 値位相ホログラム設計の手順を Fig. 5.1 に示す。設計には距離 d だけ離れた物体面とホログラム面を考え、それぞれの面内の座標を (x, y) , (X, Y) とする。物体面にはまず再生対象である物体の振幅分布 $|o(x, y)|$ を配置する。さらに、 l 回の反復計算後の物体面上で得られる位相分布 $p^l(x, y)$ をこれに付加すると、このときの物体面上の複素振幅分布 $g^l(x, y)$ は、

$$g^l(x, y) = |o(x, y)| \exp\{ip^l(x, y)\} \quad (5.1)$$

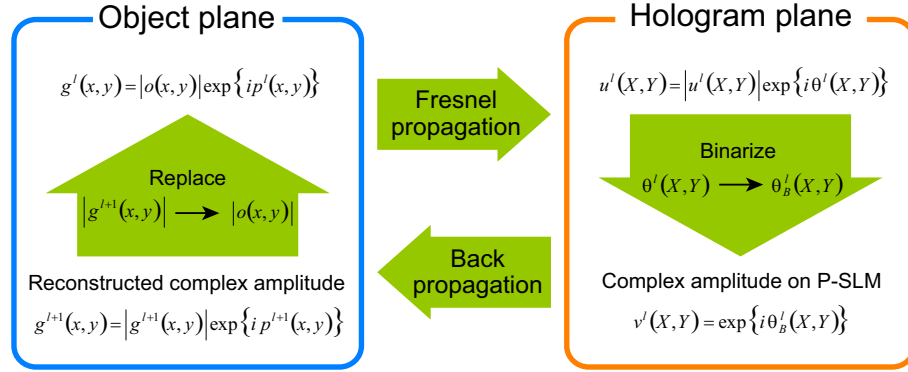


Fig. 5.1 2 値位相ホログラムの設計手順

とあらわされる．なお，初期位相 $p^0(x, y)$ はランダムな位相分布を与える． $g^l(x, y)$ をホログラム面まで Fresnel 伝搬すると，ホログラム面上の複素振幅分布は

$$\begin{aligned} u^l(X, Y) &= g^l(X, Y) \otimes h_d(X, Y) \\ &= |u^l(X, Y)| \exp\{i\theta^l(X, Y)\} \end{aligned} \quad (5.2)$$

となる．ただし，

$$h_d(X, Y) = \exp\left\{i\frac{\pi}{\lambda d}(X^2 + Y^2)\right\} \quad (5.3)$$

である．さらに，ホログラム面上で (5.2) 式中の $\theta^l(X, Y)$ のみを取り出し，

$$\theta_B^l(X, Y) = \begin{cases} 0 & |\theta^l(X, Y)| < \frac{\pi}{2} \\ \pi & \frac{\pi}{2} \leq |\theta^l(X, Y)| \leq \pi \end{cases} \quad (5.4)$$

のように 2 値化をおこなうことにより l 回の反復計算をおこなった 2 値位相ホログラムが作成される．このホログラムを P-SLM に表示し，一様な振幅の光波で照明するとホログラム面上の複素振幅分布は，

$$v^l(X, Y) = \exp\{i\theta_B^l(X, Y)\} \quad (5.5)$$

となる．これをさらに物体面まで逆伝搬することにより 1 回の反復計算が終了する．反復ごとに物体面で振幅分布のみを目標値に置き換え，この一連の手順を繰り返し計算することにより，徐々にホログラムからの再生像の画質が改善される．

5.3 数値再生シミュレーションによる 2 値位相ホログラムの画質評価

提案する 2 値位相ホログラム設計法において、それぞれ異なる初期位相 $p^0(x,y)$ を用いて複数枚のホログラムの設計をおこなうと、各ホログラムの再生像に発生するスペックルノイズの空間的な分布が変化する．このため、各ホログラムからの再生像を積算することによりノイズが平均化され物体像画質が向上する．これを適用した、再生像積算シミュレーションをおこない、設計による画質の改善を検証する．ホログラムは画素数を 256×256 、光源波長を 632.8 nm 、伝搬距離 d を 100 mm 、反復回数を 100 回として設計したものをを用いた．ホログラムの再生対象として Fig. 5.2 に示す画像を用いた．再生像の積算は、各ホログラムからの再生像強度を加算平均することにより実現した．Fig. 5.3 に設計されたホログラムによる再生像を積算した物体像を示す．また比較のために、反復計算による設計をおこなっていないホログラムによる物体像を Fig. 5.4 に示す．反復計算あり、なしのいずれの場合も積算数が増加するにつれて物体像の画質が改善されていることがわかるが、同じ積算数で比較すると、設計されたホログラムによる物体像のほうが定性的に画質が高いといえる．さらに、設計の有無による物体像の画質の差を規格化平均二乗誤差（NMSE : Normalized Mean Square Error）を指標として評価した．NMSE は

$$\text{NMSE} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{I(m,n) - o(m,n)}{o(m,n)} \right\}^2 \quad (5.6)$$

とあらわされる．ここで、 $I(m,n)$ は再生像を積算した強度分布、 M 、 N はそれぞれ横方向、縦方向の画素数である．再生像の積算数による NMSE の推移を Fig. 5.5 に示す．これより、NMSE がより小さい値に収束しているため、提案手法により設計され



Fig. 5.2 ホログラムによる再生対象



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5.3 再生像の積算数を (a) 10, (b) 30, (c) 60, (d) 100 としたときの最適化された 2 値位相ホログラムによる物体像の強度分布

たホログラムを用いた場合のほうが物体像画質が向上していることがわかる．また提案手法を用いる場合，30 枚の積算でほぼ収束値に近い値となり，NMSE も設計していないものに比べ半分程度であるため，この程度の積算枚数で十分な画質の改善が得られていると考えられる．これを実際の P-SLM により実現することを考えると，物体像を 30 fps (frame per second) の動画として表示する場合，1 フレームに 30 枚のホログラムからの再生像の積算をおこなうとすると，900 fps でホログラムの表示をおこなう必要がある．強誘電性液晶素子は 1 kfps 程度のフレームレートで動作可能であるため，提案手法による画質向上は十分実現可能であるといえる．

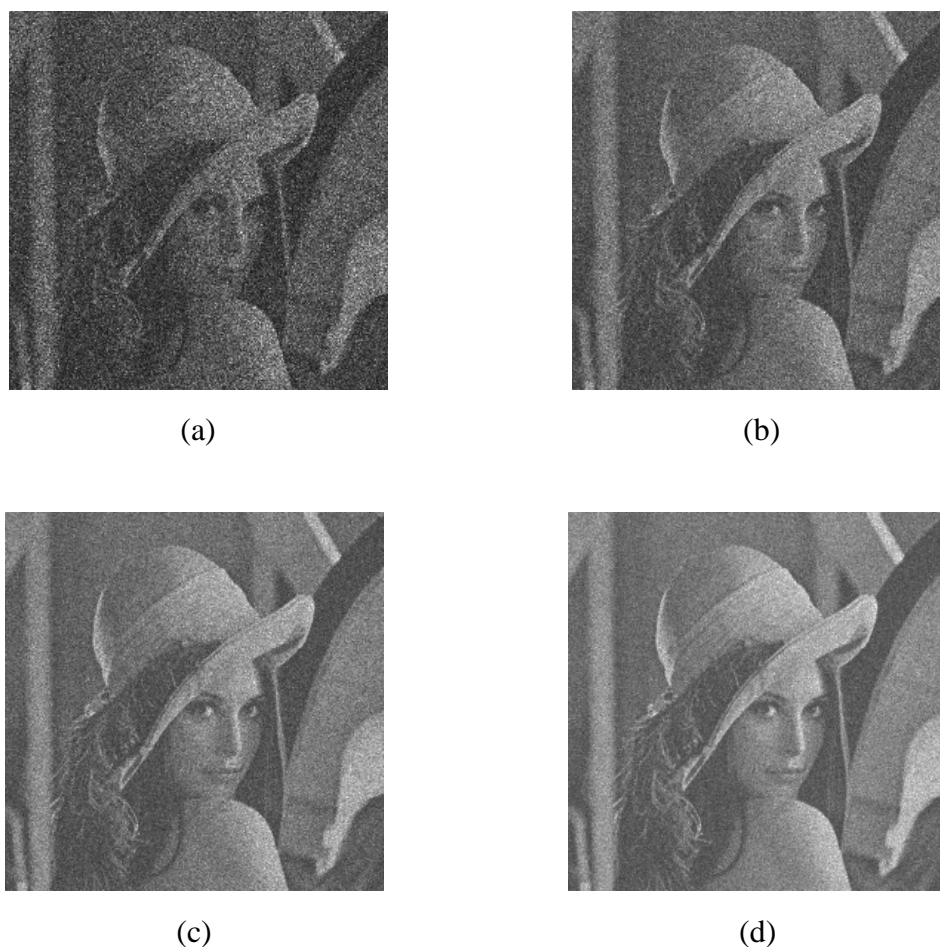


Fig. 5.4 再生像の積算数を (a) 10, (b) 30, (c) 60, (d) 100 としたときの最適化なしの 2 値位相ホログラムによる物体像の強度分布

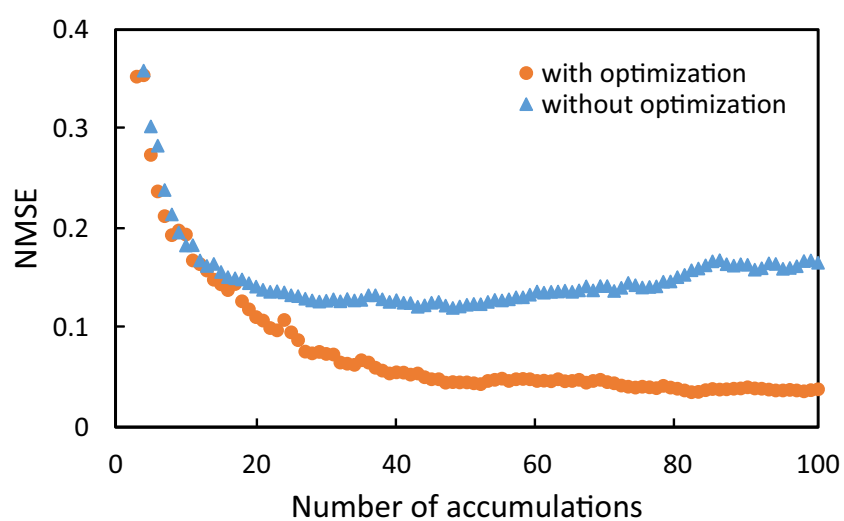


Fig. 5.5 再生像の積算数による物体像の NMSE の推移の比較

5.4 光学再生による2値位相ホログラムの再生像の評価

提案手法により設計された2値位相ホログラムを用いて光学的に積算された物体像の画質を、設計されていないものと比較することにより評価した。実験はFig. 5.6に示す光学系を用いておこない、P-SLMに2値位相ホログラムを表示した。P-SLMからの反射光のうち、位相変調されていない表面反射による不要光はAperture2により取り除き、再生像をCCDカメラで取得した。実験条件はTable 5.1に示すパラメータを用いた。再生像の積算数を1, 10, 30, 50とし、設計された2値位相ホログラムを用いたときの結果をFig. 5.7に、設計されていないときの結果をFig. 5.8に示す。定性的に再生像の積算数が増加するにつれて物体像の画質が向上していることがわかる。また、明らかに設計されたホログラムを用いたほうが物体像の画質が高いことから、シミュレーション結果によく一致しているといえる。これらの結果より、設計された

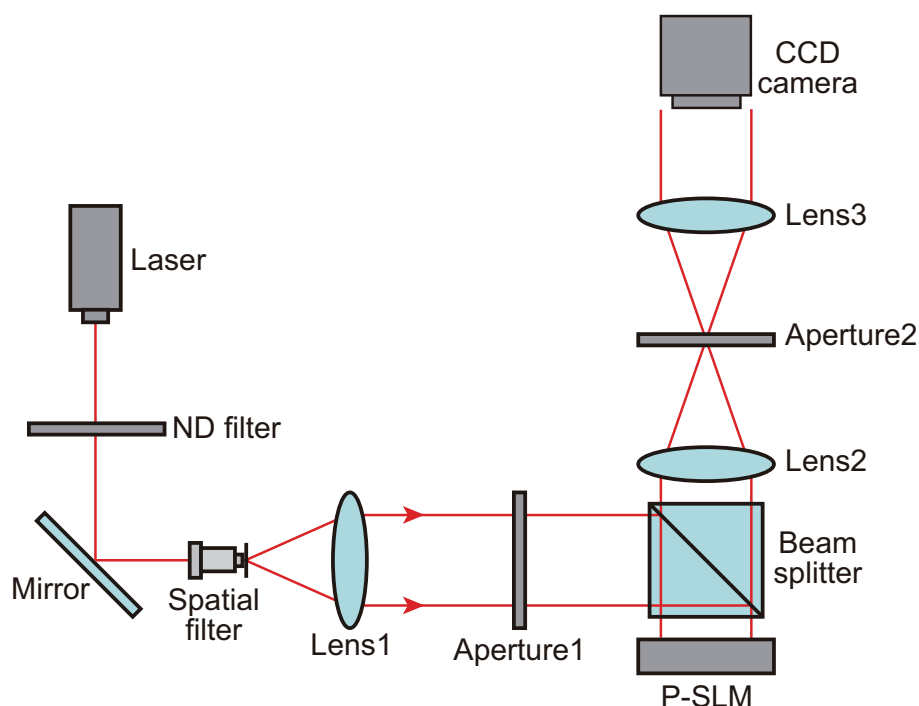


Fig. 5.6 光学再生実験光学系

Table 5.1 光学再生実験条件

Wavelength of light source	632.8 nm
Number of pixels of P-SLM	1920×1080
Pixel size of P-SLM	8 μm

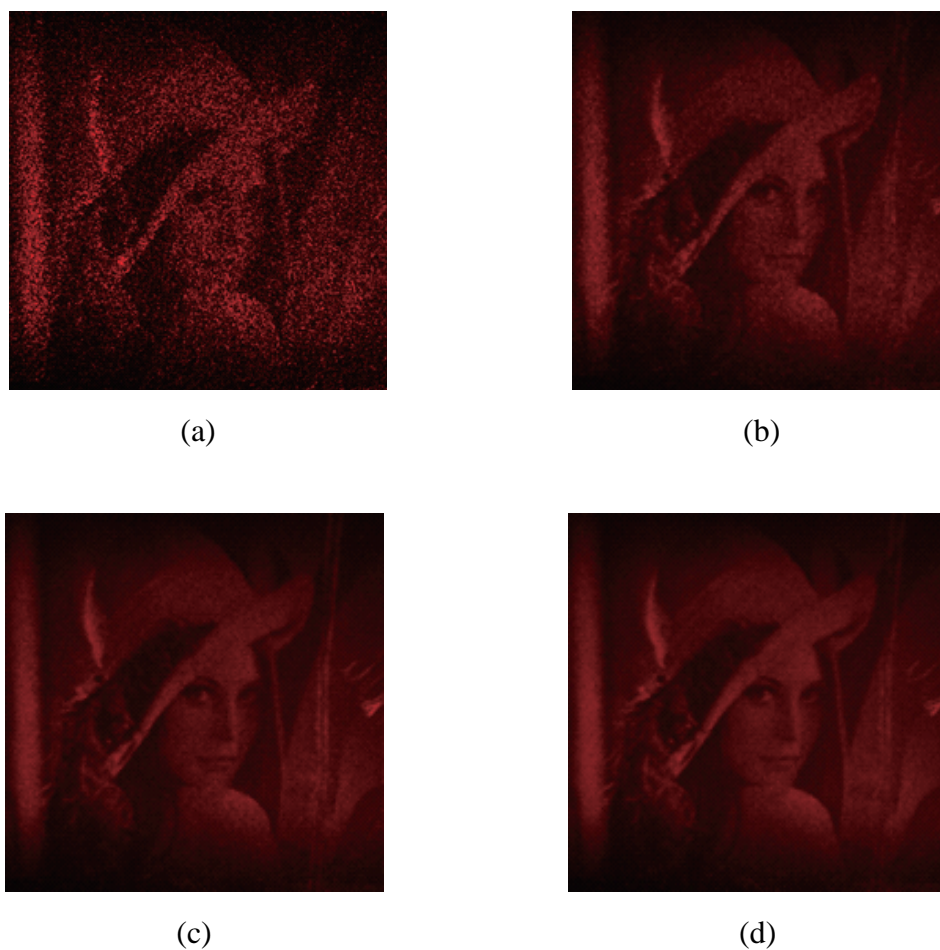


Fig. 5.7 光学再生像の積算数を (a) 1, (b) 10, (c) 30, (d) 50 としたときの最適化された 2 値位相ホログラムによる物体像

2 値位相ホログラムを用いたホログラフィックディスプレイの物体像画質向上を実証した。

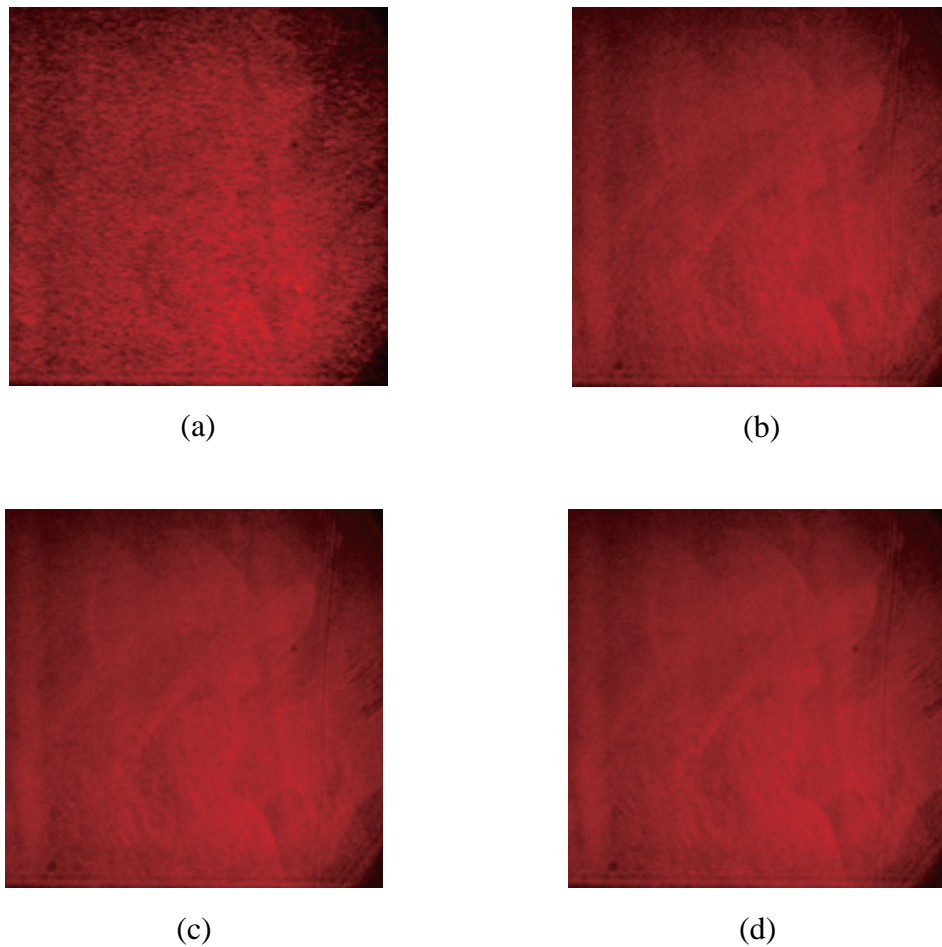


Fig. 5.8 光学再生像の積算数を (a) 1, (b) 10, (c) 30, (d) 50 としたときの最適化なしの 2 値位相ホログラムによる物体像

5.5 結言

本章では，機能性位相変調パターンの応用としてホログラフィックディスプレイの物体像画質改善について述べた．ホログラムのデータ量の低減と動画再生のための高速動作が可能な強誘電性液晶素子を用いた P-SLM にホログラムを表示することを想定し，2 値位相ホログラムの設計法を提案した．提案手法により，ホログラムの 2 値化処理に起因する再生像の画質低下を低減できる．提案するアルゴリズムにより設計した 2 値位相ホログラムを用い，再生像の積算シミュレーションをおこなった結果，提案手法を用いない場合に比べ画質の向上が可能であることを示した．また，実験により光学再生された物体像の比較においても，ホログラムを設計した場合の画質が高くシミュレーション結果によく一致している結果が得られた．

第 6 章 総括

本論文では、機能性位相変調パターンを用いて光波に空間的な位相変調を付加することによって伝搬後の光波のふるまいを自在に制御可能であることに着目し、これをホログラフィックメモリ、Shack-Hartmann 波面センサーおよびホログラフィックディスプレイの性能向上のために応用したことについて述べた。本論文の総括として各章の内容をまとめた後、最後に今後の研究課題および展望を述べる。

第 1 章では、空間位相変調技術とその一般的な適用例について簡単に述べた後、光ストレージ分野、波面計測分野、および 3 次元ディスプレイ分野に関する背景と課題について述べた。ホログラフィックメモリについては、これまでに研究されてきた手法では光利用効率について考慮されていなかったため、設計された位相マスクを用いて信号光と参照光の光利用効率と干渉効率を向上させることにより効率的に光源エネルギーおよび記録メディアを利用可能にすることを目的とした。Shack-Hartmann 波面センサーに関しては、一般的な手法における位相勾配に対するダイナミックレンジが取得される各集光スポットの形状が識別できないことにより制限される点に着目し、空間位相変調技術を応用したシステムの構造とそれにより得られた画像の解析処理の両面からダイナミックレンジの拡大を図った。ホログラフィックディスプレイについては、データ量低減のためにホログラムの 2 値化をおこなった際に再生像の画質が低下する問題に対し、2 値位相ホログラムを最適化設計することによりその画質を改善した。

第 2 章では、はじめに従来からコアキシャルホログラフィックメモリにおいて用いられているランダム位相マスクによる効果について述べ、記録密度向上のために Nyquist 開口による帯域制限をおこなった際に光利用効率が低いという課題について指摘した。次に、参照光および信号光への空間位相変調のための参照位相マスクおよび入力位相マスクの設計法について、設計の指針とアルゴリズムを詳述した。設計された参照位相マスクおよび入力位相マスクの性能はそれらの空間周波数分布を用いて評価し、従来のランダム位相マスクに比べ光利用効率、空間周波数分布のばらつきともに改善していることを数値的に示した。また、提案する位相マスクを用いた記録・再生シミュレーションおよび光学実験をおこない、所望の性能を満たしつつ記録・再生が可能であることを示した。

第 3 章では、第 2 章で提案した入力位相マスクの課題を解消するための設計法の改良について述べた。信号光の複素振幅分布はページデータと入力位相マスクのそれぞれの複素振幅分布の積であらわされるため、信号光の空間周波数分布はそれぞれの空間周波数分布の畳み込み積分であらわされる分布となる。このため、信号光の空間周

波数帯域と振幅分布を任意に設定することができなかった。これを解消するためにセル法を導入し、ページデータを構成する各セルからの信号光の空間周波数分布を評価対象として設計をおこなった。これにより、それまでの設計法に比べて空間周波数分布のばらつきは同程度であるものの、任意に帯域を設定できるようになり、光利用効率のさらなる向上が可能であることを示した。また、高周波成分をもつ入力位相マスクによる信号光への空間位相変調が再生像品質の低下につながっていることについても考慮し、隣接画素間位相差の制限を導入した。しかし、隣接画素間の位相差を制限した入力位相マスクによる再生像品質と、信号光の空間周波数の直流成分低減作用にはトレードオフの関係がある。そこで、許容位相差を変えて設計した入力位相マスクを用いて記録・再生シミュレーションをおこない、得られた再生像品質と信号光の空間周波数分布から、適切な入力位相マスク設計条件を決定するための指標となる関係を明らかにした。

第4章では、機能性位相変調パターンを Shack-Hartmann 波面センサーの性能向上のために応用したことについて述べた。Shack-Hartmann 波面センサーはその構造上、各マイクロレンズの口径で決まる検出域サイズで計測可能な位相勾配の大きさが制限される。この制限を解消するために、設計されたマイクロホログラムアレイと相関ピーク変位検出法を導入することにより位相勾配に対するダイナミックレンジを拡大する手法を提案し、その詳細な原理について述べた。さらに、提案手法により従来手法よりも大きな位相勾配をもつ波面を計測可能であることを光学実験により実証し、提案手法によるダイナミックレンジを波面計測シミュレーションにより定量的に評価した。

第5章では、ホログラフィックディスプレイの課題である SLM の書き換え速度、再生される物体像画質、ホログラムのデータ量に対して、機能性位相変調パターンを応用することにより解決を図った。高速な SLM の使用とホログラムのデータ量の低減のためホログラムの2値化をおこなうが、これにより再生像の画質が低下するため、ホログラムを反復処理により最適化設計した。設計された2値位相ホログラムにより提案するアルゴリズムを用いないものに比べて再生される物体像の画質が向上することを実証し、再生像強度積算による高画質化を考慮しても現在利用可能な SLM の性能で十分に実現可能であると考察した。

本研究では、ホログラフィックメモリの光利用効率および干渉効率向上、Shack-Hartmann 波面センサーの位相勾配に対するダイナミックレンジ拡大、ホログラフィックディスプレイにより再生される物体像画質改善に焦点を当て、それぞれに対して適した機能性位相変調パターンの設計をおこなった。情報光学分野における三つの大き

な柱である光記録，光計測，3次元ディスプレイ分野に対する機能性位相変調パターンの応用について示したが，今後 **SLM** の高画素化，高解像度化が進むことによってこの分野においても設計アルゴリズムの演算時間の増大が問題となることが予測される．当然ながら，リアルタイム性が求められるような用途では，その都度機能性位相変調パターンを設計するような使い方は，コンピュータの処理能力や設計アルゴリズムの演算量の観点からみても現実的ではない．しかしながら，あらかじめ作成しておいた機能性位相変調パターンを用いることができるような用途であれば，近年性能向上の著しい **GPU** などを用いることにより十分対応可能であると考えられる．以上のことから，本研究による研究成果は情報光学分野のみにとどまらず，さらに広範な分野への応用の可能性も期待できる．

参考文献

- [1] 左貝潤一, 光学の基礎, コロナ社, 1997.
- [2] 赤木五郎, 眼鏡学, メディカル葵出版, 2001.
- [3] Y. Shechtman, S. Gazit, A. Szameit, Y. C. Eldar, and M. Segev, “Super-resolution and reconstruction of sparse images carried by incoherent light,” *Opt. Lett.* **35**, 1148–1150 (2010).
- [4] M. Imbe and T. Nomura, “Single-exposure phase-shifting digital holography using a random-complex-amplitude encoded reference beam,” *Appl. Opt.* **52**, A161–A166 (2013).
- [5] N. Sanner, N. Huot, E. Audouard, C. Larat, J.-P. Huignard, and B. Loiseaux, “Programmable focal spot shaping of amplified femtosecond laser pulses,” *Opt. Lett.* **30**, 1479–1481 (2005).
- [6] S. Hasegawa and Y. Hayasaki, “Holographic Vector Wave Femtosecond Laser Processing,” *Int. J. Optomechatron.* **8**, 73–88 (2014).
- [7] W. M. Lee, X.-C. Yuan, and D. Y. Tang, “Optical tweezers with multiple optical forces using double-hologram interference,” *Opt. Express* **11**, 199–207 (2003).
- [8] E. Schonbrun, R. Piestun, P. Jordan, J. Cooper, K. D. Wulff, J. Courtial, and M. Padgett, “3D interferometric optical tweezers using a single spatial light modulator,” *Opt. Express* **13**, 3777–3786 (2005).
- [9] G. Li, N. Bai, N. Zhao, and C. Xia, “Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication,” *Adv. Opt. Photon.* **6**, 413–487 (2014).
- [10] S. Ohtaki, N. Murao, M. Ogasawara, and M. Iwasaki, “The Applications of a Liquid Crystal Panel for the 15 Gbyte Optical Disk Systems,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**, 1744–1749 (1999).
- [11] Y. Awatsuji, M. Sasada, and T. Kubota, “Parallel quasi-phase-shifting digital holography,” *Appl. Phys. Lett.* **85**, 1069–1071 (2004).
- [12] J. Geng, “Three-dimensional display technologies,” *Adv. Opt. Photon.* **5**, 456–535 (2013).
- [13] Y. Mori and T. Nomura, “Shortening method for optical reconstruction distance in digital holographic display with phase hologram,” *Opt. Eng.* **52**, 123101 (2013).
- [14] “ICT 化の進展がもたらす経済構造の変化,” 総務省 平成 27 年版 情報通信白書, pp. 292–325 (2015).
- [15] J. Gantz and D. Reinsel, “The Digital Universe in 2020: Big Data, Bigger Digital

- Shadows, and Biggest Growth in the Far East,” Framingham, MA: IDC; 2012.
- [16] 西田幸博, “スーパーハイビジョン放送に向けた研究開発と標準化,” 映像情報メディア学会技術報告 **38**, pp. 37–42 (2014).
 - [17] “ビッグデータの活用が促す成長の可能性,” 総務省 平成 25 年版 情報通信白書, pp. 143–179 (2013).
 - [18] 清水直樹, “マルチメディアストレージの研究動向,” 映像情報メディア学会誌 **67**, pp. 248–255 (2013).
 - [19] T. Schlesinger, B. Krogh, and T. Chen, “Applications for Fourth Generation Optical Storage,” Jpn. J. Appl. Phys. **48**, 03A002 (2009).
 - [20] E. Hecht, *OPTICS*, Addison Wesley, San Francisco, 2002.
 - [21] 村田和美, 光学, サイエンス社, 1979.
 - [22] 井上光輝, “超高速ペタバイト情報ストレージ,” 戦略的創造研究推進事業 CREST 研究終了報告書 (2006).
 - [23] “光ディスク最後の挑戦,” 日経エレクトロニクス, No. 1108, pp. 53–61 (2013).
 - [24] “アーカイブ用途の光ディスク,” 日経エレクトロニクス, No. 1134, pp. 16–17 (2014).
 - [25] S. M. Mansfield, W. R. Studenmund, G. S. Kino, and K. Osato, “High-numerical-aperture lens system for optical storage,” Opt. Lett. **18**, 305–307 (1993).
 - [26] 富永淳二, “超解像近接場構造 Super-RENS 技術による超高密度近接場光メモリ,” 電子情報通信学会誌 **89**, pp. 1000–1008 (2006).
 - [27] D. A. Parthenopoulos and P. M. Rentzepis, “Three-Dimensional Optical Storage Memory,” Science **245**, 843–845 (1989).
 - [28] P. J. v. Heerden, “Theory of Optical Information Storage in Solids,” Appl. Opt. **2**, 393–400 (1963).
 - [29] E. N. Leith, A. Kozma, J. Upatnieks, J. Marks, and N. Massey, “Holographic Data Storage in Three-Dimensional Media,” Appl. Opt. **5**, 1303–1311 (1966).
 - [30] 志村 努 [監著], “ホログラフィックメモリー総説,” ホログラフィックメモリーのシステムと材料, シーエムシー出版, 2006.
 - [31] M. Takabayashi and A. Okamoto, “Self-referential holography and its applications to data storage and phase-to-intensity conversion,” Opt. Express **21**, 3669–3681 (2013).
 - [32] H. Horimai, X. Tan, and J. Li, “Collinear holography,” Appl. Opt. **44**, 2575–2579 (2005).
 - [33] K. Tanaka, M. Hara, K. Tokuyama, K. Hirooka, K. Ishioka, A. Fukumoto, and

- K. Watanabe, “Improved performance in coaxial holographic data recording,” *Opt. Express* **15**, 16196–16209 (2007).
- [34] K. Nishimoto, F. Naito, and M. Yamamoto, “Soft-Decision Viterbi Decoding for 2/4 Modulation Code in Holographic Memory,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 4102–4106 (2006).
- [35] B. M. King and M. A. Neifeld, “Sparse modulation coding for increased capacity in volume holographic storage,” *Appl. Opt.* **39**, 6681–6688 (2000).
- [36] T. Shimura, S. Ichimura, R. Fujimura, and K. Kuroda, “Analysis of a collinear holographic storage system: introduction of pixel spread function,” *Opt. Lett.* **31**, 1208–1210 (2006).
- [37] S. Calixto, “Dry polymer for holographic recording,” *Appl. Opt.* **26**, 3904–3910 (1987).
- [38] A. Agranat and Y. Yacoby, “Dielectric photorefractive crystals as the storage medium in holographic memory systems,” *J. Opt. Soc. Am. B* **5**, 1792–1799 (1988).
- [39] P. Yeh, フォトリフラクティブ非線形光学, 富田康夫・北山研一 [訳], 丸善株式会社, 1995.
- [40] F. H. Mok, “Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate,” *Opt. Lett.* **18**, 915–917 (1993).
- [41] G. A. Rakuljic, V. Leyva, and A. Yariv, “Optical data storage by using orthogonal wavelength-multiplexed volume holograms,” *Opt. Lett.* **17**, 1471–1473 (1992).
- [42] V. B. Markov, Y. N. Denisyuk, and R. Amezcua, “3-D Speckle-Shift Hologram and Its Storage Capacity,” *Opt. Mem. Neur. Net.* **6**, 91–98 (1997).
- [43] D. Psaltis, M. Levene, A. Pu, G. Barbastathis, and K. Curtis, “Holographic storage using shift multiplexing,” *Opt. Lett.* **20**, 782–784 (1995).
- [44] T. Nomura, S. Mikan, Y. Morimoto, and B. Javidi, “Secure optical data storage with random phase key codes by use of a configuration of a joint transform correlator,” *Appl. Opt.* **42**, 1508–1514 (2003).
- [45] E. Watanabe and K. Kodate, “Optical Correlator for Face Recognition Using Collinear Holographic System,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 6759–6761 (2006).
- [46] H. Itoh, N. Matsumoto, and T. Inoue, “Spherical aberration correction suitable for a wavefront controller,” *Opt. Express* **17**, 14367–14373 (2009).
- [47] R. Foy and A. Labeyrie, “Feasibility of adaptive telescope with laser probe,” *Astron. Astrophys.* **152**, L29–L31 (1985).
- [48] N. Hubin and L. Noethe, “Active Optics, Adaptive Optics, and Laser Guide Stars,”

Science **262**, 1390–1394 (1993).

- [49] J. Liang, D. R. Williams, and D. T. Miller, “Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics,” J. Opt. Soc. Am. A **14**, 2884–2892 (1997).
- [50] H. Hofer, L. Chen, G. Y. Yoon, B. Singer, Y. Yamauchi, and D. R. Williams, “Improvement in retinal image quality with dynamic correction of the eye’s aberrations,” Opt. Express **8**, 631–643 (2001).
- [51] A. Roorda, F. R.-Borja, W. J. Donnelly III, H. Queener, T. J. Hebert, and M. C.W. Campbell, “Adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy,” Opt. Express **10**, 405–412 (2002).
- [52] Y. Zhang, J. Rha, R. S. Jonnal, and D. T. Miller, “Adaptive optics parallel spectral domain optical coherence tomography for imaging the living retina,” Opt. Express **13**, 4792–4811 (2005).
- [53] R. K. Tyson, “Bit-error rate for free-space adaptive optics laser communications,” J. Opt. Soc. Am. A **19**, 753–758 (2002).
- [54] R. K. Tyson and D. E. Canning, “Indirect measurement of a laser communications bit-error-rate reduction with low-order adaptive optics,” Appl. Opt. **42**, 4239–4243 (2003).
- [55] H. Takami, N. Takato, Y. Hayano, M. Iye, S. Oya, Y. Kamata, T. Kanzawa, Y. Minowa, M. Otsubo, K. Nakashima, W. Gaessler, and D. S.-Jacques, “Performance of Subaru Cassegrain Adaptive Optics System,” Publ. Astron. Soc. Japan **56**, 225–234 (2004).
- [56] B. C. Platt and R. Shack, “History and Principles of Shack-Hartmann Wavefront Sensing,” J. Refract. Surg. **17**, S573–S577 (2001).
- [57] R. Bünnagel, H.-A. Oehring, and K. Steiner, “Fizeau Interferometer for Measuring the Flatness of Optical Surfaces,” Appl. Opt. **7**, 331–335 (1968).
- [58] M. A. Abdulkadyrov, A. P. Semenov, Y. A. Sharov, N. V. Baryshnikov, D. G. Denisov, I. V. Zhivotovskii, and V. E. Karasik, “An unequal-arm Twyman-Green IR interferometer for monitoring the shape and quality of the surface of large optical items at the grinding stage,” J. Opt. Technol. **77**, 621–627 (2010).
- [59] L. Seifert, J. Liesener, and H. J. Tiziani, “Adaptive Shack-Hartmann sensor,” Proc. SPIE **5144**, 250–258 (2003).
- [60] R. J. Noll, “Zernike polynomials and atmospheric turbulence,” J. Opt. Soc. Am. **66**, 207–211 (1976).
- [61] J. Y. Wang and D. E. Silva, “Wave-front interpretation with Zernike polynomials,”

- Appl. Opt. **19**, 1510–1518 (1980).
- [62] J. D. Schmidt, “Zernike circle plynomials”, *Numerical Simulation of Optical Wave Propagation with examples in MATLAB*, SPIE PRESS, Washington, 2010, pp. 66–72.
 - [63] N. Lindlein, J. Pfund, and J. Schwider, “Algorithm for expanding the dynamic range of a Shack-Hartmann sensor by using a spatial light modulator array,” Opt. Eng. **40**, 837–840 (2001).
 - [64] G. Yoon, S. Pantanelli, and L. J. Nagy, “Large-dynamic-range Shack-Hartmann wavefront sensor for highly aberrated eyes,” J. Biomed. Opt. **11**, 030502 (2006).
 - [65] M. Xia, C. Li, L. Hu, Z. Cao, Q. Mu, and L. Xuan, “Shack-Hartmann wavefront sensor with large dynamic range,” J. Biomed. Opt. **15**, 026009 (2010).
 - [66] J. Pfund, N. Lindlein, and J. Schwider, “Dynamic range expansion of a Shack-Hartmann sensor by use of a modified unwrapping algorithm,” Opt. Lett. **23**, 995–997 (1998).
 - [67] S. Groening, B. Sick, K. Donner, J. Pfund, N. Lindlein, and J. Schwider, “Wavefront reconstruction with a Shack-Hartmann sensor with an iterative spline fitting method,” Appl. Opt. **39**, 561–567 (2000).
 - [68] J. Lee, R. V. Shack, and M. R. Descour, “Sorting method to extend the dynamic range of the Shack-Hartmann wave-front sensor,” Appl. Opt. **44**, 4838–4845 (2005).
 - [69] P. Bedggood and A. Metha, “Comparison of sorting algorithms to increase the range of Hartmann-Shack aberrometry,” J. Biomed. Opt. **15**, 067004 (2010).
 - [70] N. Lindlein, J. Pfund, and J. Schwider, “Expansion of the dynamic range of a Shack-Hartmann sensor by using astigmatic microlenses,” Opt. Eng. **39**, 2220–2225 (2000).
 - [71] N. Lindlein and J. Pfund, “Experimental results for expanding the dynamic range of a Shack-Hartmann sensor using astigmatic microlenses,” Opt. Eng. **41**, 529–533 (2002).
 - [72] 谷口 実, “3D ディスプレイの現状と展望 –3D 市場の創出と拡大に向けた取り組み–,” 立体視テクノロジー –次世代立体表示技術の最前線–, 株式会社 エヌ・ティー・エス, 2008, pp. 88–94.
 - [73] G. Lippmann, “Épreuves réversibles donnant la sensation du relief,” J. Phys. Theor. Appl. **7**, 821–825 (1908).
 - [74] X. Xiao, B. Javidi, M. M.-Corral, and A. Stern, “Advances in three-dimensional integral imaging: sensing, display, and applications,” Appl. Opt. **52**, 546–560 (2013).
 - [75] M. L. Huebschman, B. Munjuluri, and H. R. Garner, “Dynamic holographic 3-D

- image projection,” *Opt. Express* **11**, 437–445 (2003).
- [76] O. Matoba, K. Hosoi, K. Nitta, and T. Yoshimura, “Fast acquisition system for digital holograms and image processing for three-dimensional display with data manipulation,” *Appl. Opt.* **45**, 8945–8950 (2006).
 - [77] Y. Mori and T. Nomura, “Synthesis method from low-coherence digital holograms for improvement of image quality in holographic display,” *Appl. Opt.* **52**, 3838–3844 (2013).
 - [78] Y. Mori and T. Nomura, “Speckle reduction in hologram generation based on spherical waves synthesis using low-coherence digital holography,” *J. Display Technol.* **11**, 867–872 (2015).
 - [79] J. Amano, H. Miura, and T. Sonehara, “Speckle-noise reduction on kinoform reconstruction using a phase-only spatial light modulator,” *Appl. Opt.* **34**, 3165–3171 (1995).
 - [80] Y. Mori, T. Fukuoka, and T. Nomura, “Speckle reduction in holographic projection by random pixel separation with time multiplexing,” *Appl. Opt.* **53**, 8182–8188 (2014).
 - [81] Y. Saita, T. Nomura, E. Nitandai, and T. Numata, “Design of Reference Pattern and Input Phase Mask for Coaxial Holographic Memory,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 09ME03 (2011).
 - [82] V. Vadde, B. V. K. V. Kumar, G. W. Burr, H. Coufal, J. A. Hoffnagle, and C. M. Jefferson, “A Figure-of-merit for the Optical Aperture used in Digital Volume Holographic Data Storage,” *Proc. SPIE* **3401**, 194–200 (1998).
 - [83] F. Wyrowski, “Diffractive optical elements: iterative calculation of quantized, blazed phase structures,” *J. Opt. Soc. Am. A* **7**, 961–969 (1990).
 - [84] A. W. Lohmann and D. P. Paris, “Binary Fraunhofer Holograms, Generated by Computer,” *Appl. Opt.* **6**, 1739–1748 (1967).
 - [85] F. Wyrowski and O. Bryngdahl, “Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography,” *J. Opt. Soc. Am. A* **5**, 1058–1065 (1988).
 - [86] M. S. Kim, M. R. Feldman, and C. C. Guest, “Optimum encoding of binary phase-only filters with a simulated annealing algorithm,” *Opt. Lett.* **14**, 545–547 (1989).
 - [87] N. Yoshikawa, M. Itoh, and T. Yatagai, “Quantized phase optimization of two-dimensional Fourier kinoforms by a genetic algorithm,” *Opt. Lett.* **20**, 752–754 (1995).
 - [88] T. Nobukawa and T. Nomura, “Design of high-resolution and multilevel reference

- pattern for improvement of both light utilization efficiency and signal-to-noise ratio in coaxial holographic data storage,” *Appl. Opt.* **53**, 3773–3781 (2014).
- [89] S. R. Lambourdiere, A. Fukumoto, K. Tanaka, and K. Watanabe, “Simulation of Holographic Data Storage for the Optical Collinear System,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 1246–1252 (2006).
- [90] H. Horimai and X. Tan, “Collinear technology for a holographic versatile disk,” *Appl. Opt.* **45**, 910–914 (2006).
- [91] E. Hwang, P. Yoon, K. Kim, J. Park, and J. Lee, “Iterative Volumetric ECC Schemes for Holographic Data Storage,” *Proc. SPIE* **5380**, 304–312 (2004).
- [92] 青木尊之, 額田 彰, はじめての CUDA プログラミング, 工学社, 2009.
- [93] N. Masuda, T. Itoh, T. Tanaka, A. Shiraki, and T. Sugie, “Computer generated holography using a graphics processing unit,” *Opt. Express* **14**, 603–608 (2006).
- [94] Y. Saita and T. Nomura, “Design method of input phase mask to improve light use efficiency and reconstructed image quality for holographic memory,” *Appl. Opt.* **53**, 4136–4140 (2014).
- [95] Y. Saita, H. Shinto, and T. Nomura, “Holographic Shack-Hartmann wavefront sensor based on correlation peak displacement detection method for wavefront sensing with large dynamic range,” *Optica* **2**, 411–415 (2015).
- [96] J. Rha and M. K. Giles, “Implementation of an adaptive Shack-Hartmann sensor using a phase-modulated liquid crystal spatial light modulator,” *Proc. SPIE* **4493**, 80–87 (2002).
- [97] 清水雅夫, “パターンの検出,” デジタル画像処理, 奥富正敏 [編], 財団法人 画像情報教育振興協会, 2004, pp. 202–207.
- [98] 野村孝徳, “相関演算,” 原理がわかる・現場で使える信号処理, 伊東一良 [編], 丸善株式会社, 2009, pp. 99–108.
- [99] S. Thomas, T. Fusco, A. Tokovinin, M. Nicolle, V. Michau, and G. Rousset, “Comparison of centroid computation algorithms in a Shack-Hartmann sensor,” *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **371**, 323–336 (2006).
- [100] R. B. Wayth, L. J. Greenhill, and F. H. Briggs, “A GPU-based Real-time Software Correlation System for the Murchison Widefield Array Prototype,” *Publ. Astron. Soc. Pac.* **121**, 857–865 (2009).
- [101] D. G. Smith and J. E. Greivenkamp, “Generalized method for sorting Shack-Hartmann spot patterns using local similarity,” *Appl. Opt.* **47**, 4548–4554 (2008).
- [102] 最田裕介, 神藤宏伸, 野村孝徳, “ハニカム構造を有するマイクロホログラムアレ

イを用いたホログラフィック Shack-Hartmann 波面センサーによる波面計測,” 第 62 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, p. 04-452 (2015).

- [103] K. Masuda, Y. Saita, R. Toritani, P. Xia, K. Nitta, and O. Matoba, “Improvement of Image Quality of 3D Display by using Optimized Binary Phase Modulation and Intensity Accumulation,” J. Display Technol. (2015) (in press).
- [104] R. G. Dorsch, A. W. Lohmann, and S. Sinzinger, “Fresnel ping-pong algorithm for two-plane computer-generated hologram display,” Appl. Opt. **33**, 869–875 (1994).

謝辞

本論文は，神戸大学大学院システム情報学研究科博士課程後期課程在学中に，本学システム計測研究室ならびに，現在奉職させていただいている和歌山大学情報フォトニクス研究室においておこなってきた研究成果をまとめたものである。

終わりに臨み，博士課程後期課程進学にあたり，指導教員として暖かく見守ってくださり，本研究の遂行および本論文の作成に際しても終始懇切丁寧な御指導，御鞭撻を賜りました神戸大学大学院システム情報学研究科システム科学専攻 的場修 教授に深く感謝の意を表すとともに，心より御礼申し上げます。

本論文の審査に際し，御多忙にも関わらず御校閲を賜り，貴重な御意見，御指摘を賜りました神戸大学大学院システム情報学研究科システム科学専攻 貝原俊也 教授，ならびに 小島史男 教授，同研究科情報科学専攻 太田能 教授に厚く御礼申し上げます。

本研究遂行にあたり有益な御助言，御教示を賜り，学会などの場においても御指導，御協力いただいた神戸大学大学院システム情報学研究科システム科学専攻 仁田功一 准教授に心より御礼申し上げます。

和歌山大学システム工学部光メカトロニクス学科 野村孝徳 教授には，同大学システム工学部ならびに同大学院システム工学研究科博士前期課程在学時に指導教員として御指導いただき，研究者としての在り方を御教示いただきました。また，その後も助教として迎えてくださり，研究の機会，環境の提供および，実際の研究遂行から本論文の執筆に至るまで，終始懇切丁寧な御指導，御鞭撻を賜りました。ここに深く感謝の意を表すとともに，心より厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり，有益な議論を交わし，研究協力を賜りました和歌山大学大学院システム工学研究科博士後期課程 信川輝吉 氏，ならびに同研究科博士前期課程 神藤宏伸 氏に心より御礼申し上げます。

本論文執筆に際し，有益な御助言，御指摘を賜りました和歌山大学大学院システム工学研究科博士後期課程 井邊真俊 氏（現，国立研究開発法人産業技術総合研究所），森裕 氏（現，香川大学工学部電子・情報工学科），ならびに渡辺果歩 氏に厚く御礼申し上げます。

神戸大学システム計測研究室ならびに和歌山大学情報フォトニクス研究室の皆様方には，研究のみならず多岐にわたり御世話になりました。謹んで御礼申し上げます。

終わりに，長きにわたり学業，仕事の両面から応援して下さった家族や友人，進学にともなう退職に際して暖かく送り出してくださったパナソニック フォト・ライティング株式会社（前職）の皆様方，ならびに終始激励して下さったすべての方々の多大なる御支援の下に本論文が執筆できたことをここに記し，心より感謝の意を表します。

研究業績

学術論文

- 1) Y. Saita, T. Nomura, E. Nitandai, and T. Numata, “Design of Reference Pattern and Input Phase Mask for Coaxial Holographic Memory,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 09ME03 (2011).
- 2) Y. Saita and T. Nomura, “Design method of input phase mask to improve light use efficiency and reconstructed image quality for holographic memory,” *Appl. Opt.* **53**, 4136–4140 (2014).
- 3) Y. Saita, H. Shinto, and T. Nomura, “Holographic Shack-Hartmann wavefront sensor based on correlation peak displacement detection method for wavefront sensing with large dynamic range,” *Optica* **2**, 411–415 (2015).
- 4) K. Masuda, Y. Saita, R. Toritani, P. Xia, K. Nitta, and O. Matoba, “Improvement of Image Quality of 3D Display by using Optimized Binary Phase Modulation and Intensity Accumulation,” *J. Display Technol.* (2015) (in press).

学術講演（国際会議）

- 1) Y. Saita, T. Nomura, E. Nitandai, and T. Numata, “Design of Reference Pattern and Input Phase Mask for Coaxial Holographic Memory,” *International Symposium on Optical Memory 2010 (ISOM’10) Technical Digest*, pp. 146–147 (2010).
- 2) Y. Saita, T. Iwamoto, and T. Nomura, “Design and Verification of Input Phase Mask Suitable for Page Data for Coaxial Holographic Memory,” *International Symposium on Optical Memory 2013 (ISOM’13) Technical Digest*, pp. 120–121 (2013).
- 3) T. Nomura and Y. Saita, “Coaxial Holographic Memory with Spatially Modulated Lightwaves,” *International Symposium on Optical Memory 2014 (ISOM’14) Technical Digest*, pp. 32–33 (2014).
- 4) Y. Saita and T. Nomura, “Phase Gradient Coding and its Detection Method for Holographic Data Storage,” *International Symposium on Optical Memory 2014 (ISOM’14) Technical Digest*, pp. 38–39 (2014).
- 5) Y. Saita, H. Shinto, and T. Nomura, “Wavefront measurement with Large Dynamic

Range Using Holographic Shack-Hartmann wavefront sensor,” *14th Workshop on Information Optics (WIO2015) Conference Program & Technical Digest*, Th-P3 (2015).

- 6) Y. Saita and T. Nomura, “Speckle Multiplexed Recording of Phase Gradient Coded Data in Coaxial Holographic Data Storage,” *International Symposium on Optical Memory 2015 (ISOM’15) Technical Digest*, pp. 112-113 (2015).
- 7) H. Shinto, Y. Saita, and T. Nomura, “Expansion of dynamic range in Shack-Hartmann wavefront sensor using dual microlens array,” *SPIE/OSJ Biophotonics Japan 2015 Technical Summaries*, p. 9792-48 (2015).
- 8) K. Masuda, Y. Saita, R. Toritani, P. Xia, K. Nitta, and O. Matoba, “Improvement of Image Quality of Three-dimensional Display Using a Binary Phase Distribution,” *Proceedings of the International Display Workshops (IDW’15)*, Vol. 22, pp. 889–892 (2015).

学術講演（国内会議）

- 1) 最田裕介, 野村孝徳, “任意のページデータに適した入力位相マスク設計によるホログラフィックメモリの再生像画質改善手法,” 日本光学会 (応用物理学会) 年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2013 講演予稿集, 14pE4 (2013).
- 2) 最田裕介, 野村孝徳, “位相型マイクロホログラムアレイを用いた Shack-Hartmann 型波面センサーのダイナミックレンジ拡大手法,” 第 61 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, p. 03-099 (2014).
- 3) 最田裕介, 野村孝徳, “コアキシャルホログラフィックメモリにおける位相マスクの最適化設計,” 第 19 回ボリュームホログラフィックメモリ技術研究会講演予稿集, pp. 5–8 (2014).
- 4) 最田裕介, 野村孝徳, “相関ピーク検出法によるホログラフィック Shack-Hartmann 波面センサーのダイナミックレンジ拡大,” 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, p. 03-271 (2014).
- 5) 神藤宏伸, 最田裕介, 野村孝徳, “二重焦点マイクロレンズアレイを用いた広ダイナミックレンジ Shack-Hartmann 波面センサー,” 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, p. 03-317 (2014).
- 6) 最田裕介, 野村孝徳, “位相勾配符号化法を適用したホログラフィックメモリに

おける多値記録特性評価,” 日本光学会 (応用物理学会) 年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2014 講演予稿集, 7pE10 (2014).

- 7) 最田裕介, 神藤宏伸, 野村孝徳, “広ダイナミックレンジを有するホログラフィック Shack-Hartmann 波面センサー,” レーザー学会第 470 回研究会報告, pp. 7–12 (2014).
- 8) 最田裕介, 神藤宏伸, 野村孝徳, “ハニカム構造を有するマイクロホログラムアレイを用いたホログラフィック Shack-Hartmann 波面センサーによる波面計測,” 第 62 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, p. 04-452 (2015).
- 9) 神藤宏伸, 最田裕介, 野村孝徳, “配向方向の異なる長球状マイクロレンズアレイを用いた広ダイナミックレンジ Shack-Hartmann 波面センサー,” 第 62 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, p. 04-574 (2015).
- 10) 野村孝徳, 最田裕介, 信川輝吉, “位相多値記録ホログラフィックメモリの再生データ検出技術,” 第 21 回ボリュウムホログラフィックメモリ技術研究会講演予稿集, pp. 14–19 (2015).
- 11) 最田裕介, 神藤宏伸, 野村孝徳, “適切なテンプレートを用いたパターンマッチングに基づいたホログラフィック Shack-Hartmann 波面センサーのダイナミックレンジおよび計測精度の評価,” 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, p. 03-374 (2015).
- 12) 最田裕介, 神藤宏伸, 野村孝徳, “計算機合成ホログラムを用いた広ダイナミックレンジ Shack-Hartmann 波面センサーの実験的評価,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2015 講演予稿集, 30aD6 (2015).

神戸大学博士論文「機能性位相変調パターンの光学的応用に関する研究」全 87 頁

提 出 日 2016 年 1 月 21 日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ **Kernel** にて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリポジトリの該当ページ上に掲載されます。

© 最田 裕介

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。